

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁRSKA PRÁCA

2012

Ľuboš Balala

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Riadenie jednofázového usmerňovača
Control of Single-Phase Rectifier

2012

Ľuboš Balala

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Ľuboš Balala

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika

Téma:

Řízení jednofázového usměrňovače
Control of Single-Phase Rectifier

Zásady pro vypracování:

1. Uveďte možnosti realizace řídicích obvodů jednofázových usměrňovačů
2. Podle pokynů vedoucího realizujte vybrané zapojení
3. Měřením ověřte správnou činnost řídicí jednotky

Seznam doporučené odborné literatury:

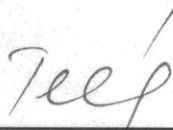
Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Týmto prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne a uviedol som v nej všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som pre jej tvorbu čerpal.

Dátum odovzdania . 2.5.2012

Podpis : Balala

Pod'akovanie:

Týmto by som sa chcel poďakovať Ing. Tomášovi Pavelkovi, Ph.D., ktorý ma viedol pri spracovaní bakalárskej práce, za cenné rady a čas strávený pri riešení problémov týkajúcich sa spracováanej problematiky.

Abstrakt:

Bakalárska práca sa zaoberá problematikou riadenia a ovládania jednofázového plne riadeného usmerňovača. V práci sú uvedené princípy a možnosti realizácie riadiacich obvodov, ako aj podrobný popis a vysvetlenie funkcie jednotlivých typov zapojení. Súčasťou práce je samotná realizácia a rozbor vybraného typu zapojenia, spracované výsledky merania a na záver práce je uvedené celkové zhodnotenie danej problematiky.

Kľúčové slová:

Fázové riadenie, riadiace obvody, tyristor, riadený usmerňovač, IO TCA 785

Abstract:

This bachelor thesis deals with the management and control of single-phase fully controlled rectifier. The paper presents the principles and possibilities of implementation of control circuits, as well as a detailed description and explanation of the functions of individual types of connections. In the work is the realization and analysis of the selected type of involvement, processed measurement results and at the conclusion is that overall assessment of the issue.

Keywords:

Phase control, control circuits, thyristor, the controlled rectifier, IC TCA 785

Zoznam použitých symbolov a skratiek

| Veličina | Jednotka | Význam |
|----------------------------|------------------|---|
| ΔB | T | zdvih magnetickej indukcie |
| A_L | H | činiteľ indukčnosti |
| B_{max} | T | maximálna hodnota magnetickej indukcie |
| B_R | T | zostatková magnetická indukcia |
| I_{5ef} | A | efektívna hodnota prúdu synchronizačného vstupu |
| $I_{Demag}, I_{Demag(AV)}$ | A | maximálna a stredná hodnota prúdu prechádzajúceho demagnetizačnou diódou |
| I_{GT} | A | prúd hradla tyristoru |
| I_{PRIM1} | A | prúd primárneho vinutia impulzného transformátora |
| $I_{PRIM1(ef)}$ | A | efektívna hodnota primárneho prúdu impulzného transformátora |
| I_Q | A | výstupný prúd obvodov určených pre fázové riadenie |
| I_{SEK1} | A | prúd sekundárneho vinutia impulzného transformátora |
| $I_{SEK1(ef)}$ | A | efektívna hodnota sekundárneho prúdu impulzného transformátora |
| $I_{\mu max}$ | A | maximálna hodnota magnetizačného prúdu |
| $J1, J2$ | A/m ² | prúdová hustota |
| L_{1TR1} | H | indukčnosť primárneho vinutia impulzného transformátora |
| N_1, N_2 | - | počet závitov primárneho a sekundárneho vinutia impulzného transformátora |
| S_e | m ² | náhradný (ekvivalentný) prierez magnetického obvodu |
| $S_{PRIM1 cu}$ | m ² | prierez vodiča primárneho vinutia |
| $S_{SEK1 cu}$ | m ² | prierez vodiča sekundárneho vinutia |
| T | s | perióda |
| U_F | V | úbytok napätia na dióde |
| U_{GT} | V | napätie hradla tyristoru |
| U_P | V | napätie píly |
| U_{PRIM1} | V | napätie primárneho vinutia impulzného transformátora |
| U_{SEK1} | V | napätie sekundárneho vinutia impulzného transformátora |
| $U_{synch(ef)}$ | V | efektívna hodnota vzorky synchronizačného napätia |

| | | |
|-----------------------|----|---|
| d_{PRIM1}, d_{SEK1} | m | čistý (bez izolácie) priemer vodiča primárneho a sekundárneho vinutia impulzného transformátora |
| f | Hz | frekvencia |
| l_e | m | stredná dĺžka magnetickej siločiar |
| n | - | napäťový prevod impulzného transformátora |
| t_1 | s | šírka prenášaného impulzu |
| t_p | s | štandardná dĺžka trvania impulzu udávaná výrobcom IO |
| u_C | V | napätie na kondenzátore |
| α | ° | radiaci uhol |

Obsah

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | Úvod | 1 |
| 2. | Riadiace obvody jednofázových usmerňovačov | 2 |
| 2.1. | Obvody zostavené pomocou RC členov | 2 |
| 2.2. | Riadiace obvody s diskretnými polovodičovými súčiastkami | 4 |
| 2.2.1. | Tranzistorové riadiace obvody | 4 |
| 2.3. | Analógové riadiace obvody | 5 |
| 2.3.1. | Detektor prechodu sieťového napätia nulou | 6 |
| 2.3.2. | Generátor spínacích impulzov | 7 |
| 2.3.3. | Koncové spínacie obvody | 8 |
| 2.4. | Riadiace obvody s integrovanými obvody | 11 |
| 3. | Realizácia riadiacej jednotky tvorenej integrovaným obvodom TCA 785 | 14 |
| 3.1. | Popis použitého integrovaného obvodu TCA 785 | 14 |
| 3.2. | Riadiaca časť | 18 |
| 3.3. | Koncové spínacie obvody riadiacej jednotky | 19 |
| 3.3.1. | Návrh impulzného transformátora | 20 |
| 3.4. | Napájanie riadiaceho obvodu | 25 |
| 4. | Meranie na realizovanej riadiacej jednotky | 26 |
| 4.1. | Overenie funkcie navrhnutého impulzného transformátora | 26 |
| 4.2. | Overenie funkcie riadiacej jednotky pri zmene riadiaceho uhla α | 28 |
| 4.3. | Overenie funkcie riadiacej jednotky pripojenej k jednopulznému usmerňovaču | 30 |
| 5. | Záver | 32 |
| | Literatúra | 33 |
| | Zoznam príloh | 34 |

1. Úvod

Predmetom bakalárskej práce je zoznámiť sa s princípom funkcie a možnosťami riadenia plne riadeného jednofázového usmerňovača. Riadený usmerňovač je menič, ktorý umožňuje premenu striedavej elektrickej energie napájacieho napätia na elektrickú energiu jednosmernú s možnosťou zmeny strednej hodnoty výstupného napätia a prúdu. Takéto riadenie využívajú akčné členy, napr. tyristory, ktoré tvoria základ výkonovej časti usmerňovača. Zmeny výstupných veličín zabezpečujeme prostredníctvom fázového riadenia. Zmenou okamihu zopnutia tyristoru resp. zmenou riadiaceho uhla α meníme strednú hodnotu výstupného usmerného jednosmerného napätia. Riadiaci uhol označujeme malým písmenom gréckej abecedy α , jeho hodnota u jednofázových usmerňovačov nadobúda hodnoty v rozmedzí od 0° do 180° . Vhodne zvolená regulácia riadiaceho uhla α umožňuje meniť strednú hodnotu výstupného jednosmerného napätia od nulovej hodnoty až po maximálnu hodnotu. Tieto vlastnosti riadeného tyristorového usmerňovača sa využívajú predovšetkým v elektrických pohonoch. U univerzálnych motorov môžeme regulovať rotorové napätie alebo budiaci prúd, ako aj prúd budenia synchronných motorov. Regulácia umožňuje strojom takmer bezstratovo meniť ich mechanické a elektrické vlastnosti. Riadene usmerňovače sa používajú tiež na reguláciu tepelného alebo svetelného výkonu.

Riadiace obvody zabezpečujú privedenie prúdu do riadiacej elektródy a okrem zopnutia tyristorov môžeme ovplyvňovať ich parametre a charakteristiky súčiastok. Tak napríklad privedený kladný prúd do riadiacej elektródy zväčšuje záverný prúd tyristoru, predlžuje vypínaciu dobu a znižuje odolnosť tyristoru proti strmosti nárastu blokacieho (komutačného) napätia. V rôznych prevádzkových aplikáciách môžu tieto vplyvy pôsobiť na spoľahlivý chod tyristorových zariadení a pôsobením ďalších prevádzkových vplyvov (napr. teplotou, prúdovým zaťažením, strmosťou nárastu priepustného prúdu atď.) môžu trvalo zmeniť charakteristiky tyristorov, prípadne spôsobiť ich úplné zničenie. Trvalé zmeny parametrov (prípadne i zničenie tyristorov) môže nastať i vtedy, ak privedieme do riadiacej elektródy väčší signál ako je prípustné. Tak napríklad pri nadmernom výkonovom namáhaní obvodu riadiacej elektródy sa môže pretaviť vývod riadiacej elektródy alebo pretaviť kremíková doštička pri jej kontakte. Týmto sa stratí ovládateľnosť súčiastok alebo dôjde k deštrukcii tyristorov. Riadiaci signál nedostatočných parametrov môže byť naopak príčinou nespoľahlivého zapínania tyristorov pri zníženej prevádzkovej teplote, pri veľkej indukčnosti záťaže, alebo môže výrazne zmenšiť odolnosť tyristorov proti strmosti nárastu priepustného prúdu. Aby bola prevádzka tyristorov spoľahlivá, musí mať riadiaci signál parametre odpovedajúce prevádzkovým podmienkam danej aplikácie. Voľba parametrov riadiaceho signálu pre návrh riadiacich obvodov závisí od daného typu tyristora. [2]

V nasledujúcej kapitole je rozdelenie riadiacich obvodov a to v závislosti od použitých typov súčiastok. Ďalej je vysvetlený princíp funkcie jednotlivých typov zapojenia riadiacich obvodov. V kapitole 3. je zdokumentovaná realizácia konkrétneho riadiaceho obvodu s použitím integrovaného obvodu TCA 785. Kapitola 4. sa zaoberá overením správnej funkcie realizovanej riadiacej jednotky.

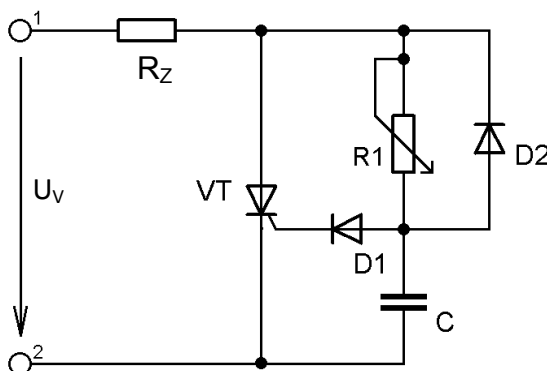
2. Riadiace obvody jednofázových usmerňovačov

Riadiace obvody zabezpečujú zopnutie tyristorov v požadovanom okamžiku kladnej polperiody anódového napätia a umožňujú okamžik zopnutia plynule riadiť v potrebnom rozsahu riadiacich uhlov.

Na túto činnosť môžeme použiť množstvo obvodov. Takéto obvody môžeme zostaviť pomocou troch druhov súčiastok :

- pasívnych súčiastok – obvody zostavené pomocou RC členov,
- diskretných súčiastok – obvody zostavené pomocou diskretných polovodičových súčiastok,
- integrovaných obvodov. [1], [2]

2.1. Obvody zostavené pomocou RC členov



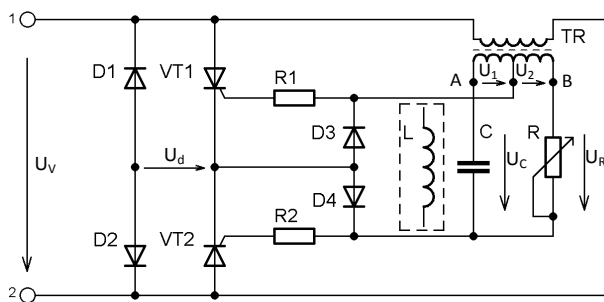
Obr. 1: Jednopolzný riadený usmerňovač s riadiacim obvodom zostaveným pomocou RC členov. [1], [2]

Zapojenie najjednoduchšieho obvodu je na obr. 1. V zápornej polperióde anódového napätia sa kondenzátor C nabije cez diódu D_2 na amplitúdu napájacieho napätia. Dióda D_1 je v rovnakom okamžiku polarizovaná v závernom smere a obvodom riadiacej elektródy tyristoru neprechádza prúd. V ďalšej časti zápornej polperiódy a ďalej potom v kladnej polperióde sa kondenzátor vybíja, cez odpor R_1 . Rýchlosť vybíjania kondenzátoru je závislá na veľkosti odporu R_1 a zmenou jeho odporu ju môžeme plynulo meniť. Ako náhle sa kondenzátor nabije na malú kladnú hodnotu, začne prúd prechádzať diódou D_1 a obvodom riadiacej elektródy tyristoru. Tyristor zopne potom ako napätie na kondenzátore dosiahne hodnotu $u_C = U_{GT} + U_F$ (U_F je úbytok napätia na dióde odpovedajúci prúdu I_{GT}).

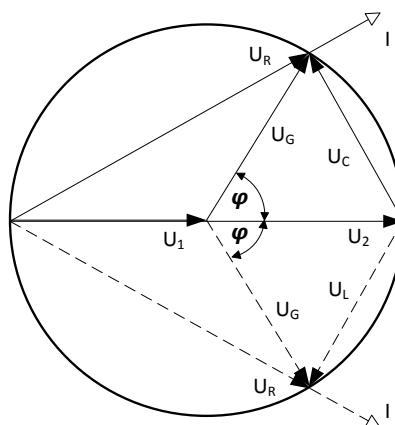
Medzi riadiace obvody s RC členmi patrí aj fázový mostík. Jeho schéma zapojenia je na obr. 2. Tyristory VT_1 a VT_2 sú zapojené do dvoch vetiev jednofázového mostíka. Diódy D_3 a D_4 zapojené diagonálne vo fázovom mostíku zaisťujú, aby prúd do riadiacich elektród prechádzal iba v priepustnom smere. Odporu R_1 a R_2 obmedzujú prúd do riadiacej elektródy na potrebnú veľkosť.

Vlastný fázový mostík pozostáva z transformátoru TR , kondenzátoru C (tlmivky L) a odporu R . Činnosť obvodu si vysvetlíme pomocou napäťového diagramu, ktorý je na obrázku obr. 3. Na odporu R vzniká úbytok napätia U_R , ktorý je vo fáze s prúdom I prechádzajúcim medzi bodmi A a B fázového mostíku. Napätie U_C (U_L) na kondenzátore (tlmivke) zaostáva (predbieha) o 90° za (pred) prúdom I . Vektorový súčet U_R a U_C (U_L) je rovný napätiu na sekundárnom vinutí transformátoru TR – tzn. Súčtu napätí $U_1 + U_2$. Napätie medzi bodmi C,D určuje vektor U_G podľa vektorového diagramu. Uhol φ , ktorý zviera s vektorom napätia ($U_1 + U_2$) vyjadruje nasledujúci vzťah. [1], [2]

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{U_C}{U_R} = \frac{1}{\omega CR} \quad (1)$$



Obr. 2: Zapojenie fázového mostíka na riadenie 2 tyristorov. [1], [2]



Obr. 3: Napäťový diagram. [1], [2]

Z tohto nám vypláva, že zmenou R (alebo kapacity C ; indukčnosti L) môžeme meniť fázú napätia U_G – teoreticky v rozsahu od 0° (pre $R \rightarrow \infty$) až do 180° (pre odpor $R = 0$). Skutočný rozsah je však od 20° do 150° , čo postačuje pre jednoduché aplikácie.

Zapojenie riadiacich obvodov pomocou RC členov (prípadne RL členov) je veľmi jednoduché, ale napriek tomu sa v praxi využíva len veľmi málo, a to len u najjednoduchších zapojení tyristorov s ručným riadením výstupného výkonu a súčasne tam, kde po zapnutí narastá prúd tyristorom veľmi pomaly.

Hlavné prednosti takýchto riadiacich obvodov s RC členmi môžeme zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- Jednoduchosť zapojenia pre obvody s jedným tyristorom (alebo dvoma tyristormi zapojenými so spoločnou katódou) a malým rozsahom fázového riadenia.
- Veľká preťažiteľnosť a robustnosť.

Obvody tvorené RC členmi majú však viac nevýhod a nedostatkov, ktoré prevládajú nad prednosťami. Z toho môžeme usúdiť, že pre riadenie tyristorov sú tieto obvody najmenej vhodné. Nevýhody sú nasledujúce:

- Impulzy riadiaceho prúdu nemajú dostatočný nárast strmosti, takže zapínanie tyristorov nie je jednoznačné, a to hlavne pri zmenách prevádzkovej teploty.
- Ťažko sa prispôbujú pre zariadenia, u ktorých je požiadavka na samočinné riadenie výstupnej veličiny.
- Veľký príkon riadiacich obvodov (vzniká značný stratový výkon na jednotlivých súčiastkach obvodov).
- Nevhodné pre zapojenia do regulačných obvodov.
- Nedajú sa použiť pre zložité viacfázové zapojenia. [1], [2]

2.2. Riadiace obvody s diskretnými polovodičovými súčiastkami

Pre zostrojenie jednoduchých, ale aj zložitejších riadiacich obvodov na fázové riadenie okamihu zopnutia tyristorov môžeme použiť niekoľko polovodičových súčiastok. V nasledujúcej časti si popíšeme stručnú činnosť najčastejšie používaných hlavných súčiastok a nimi tvorené jednoduché riadiace obvody. [1]

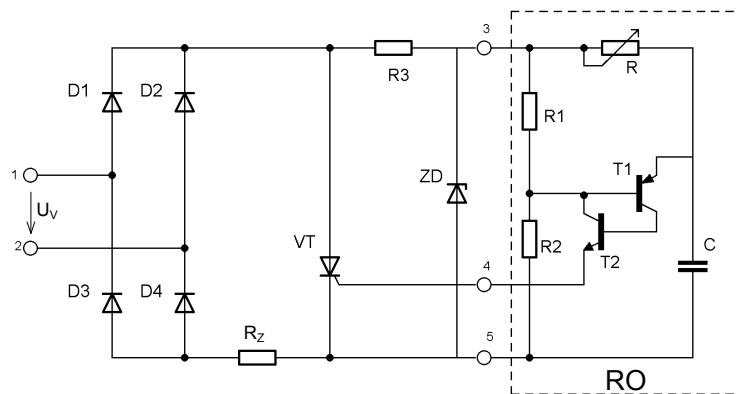
2.2.1. Tranzistorové riadiace obvody

Tranzistory môžeme použiť na vytvorenie jednoduchých, ale aj náročnejších riadiacich obvodov, ktoré sú schopne pracovať v ľubovoľných pracovných podmienkach. Hlavnou oblasťou využitia tranzistorových riadiacich obvodov je priemyselná elektronika.

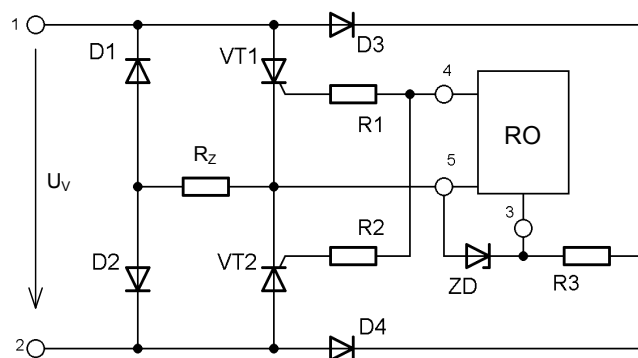
Tranzistorový riadiaci obvod obr. 4 pozostáva z dvoch komplementárnych tranzistorov typu PNP a NPN. Obvod pracuje tak, že v každej polperióde napájacieho napätia sa kondenzátor C

nabíja, pokiaľ jeho napätie u_C nedosiahne väčšiu hodnotu ako napätie na odporu R . V okamžiku kedy platí $u_C > u_R$, začína obvodom emitor baza tranzistoru T_1 prechádza prúd. Tranzistor T_1 sa otvára a otvára aj tranzistor T_2 . Kondenzátor C sa vybíja cez riadiacu elektródu zapínaného tyristora, ktorý zopne.

Zmenou odporu R môžeme meniť nabíjajúcu časovú konštantu kondenzátora C a tým aj okamih zopnutia tranzistorového obvodu s tyristorom VT. Pokiaľ potrebujeme riadiť uhol zopnutia tyristoru elektrickým signálom, nahradíme odpor R tranzistorom alebo tranzistorom premostíme kondenzátor C . Typické zapojenia pripojenia takéhoto riadiaceho obvodu k tyristorom môžeme vidieť na obr. 4 a obr. 5. [1], [2]



Obr. 4: Tranzistorový riadiaci obvod pripojený k tyristoru, ktorý nie je zaťažovaný záverným napätím. [1], [2]



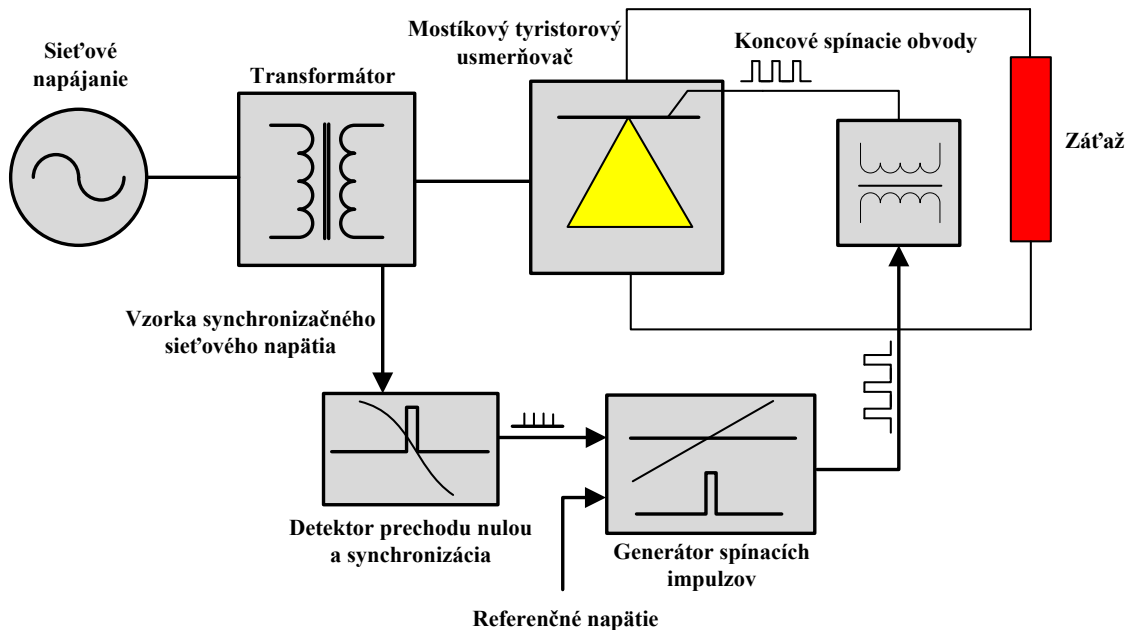
Obr. 5: Pripojenie tranzistorového riadiaceho obvodu z obr. 4 k tyristorom, ktorých katódy sú spojené do jedného bodu. [1], [2]

2.3. Analógové riadiace obvody

Spínacie impulzy privádzané na tyristory musia byť zosynchronizované so sieťovým napätím. K zaisteniu tejto podmienky je potrebné použitie obvodov, ako je detektor prechodu sieťového napätia nulou. Tento obvod nám zabezpečuje synchronizáciu do obvodu generovania riadiacich impulzov pre spínanie tyristorov. [5]

Celkove blokové zapojenie riadiaceho systému je zobrazené na obr. 6. Riadiaci systém pozostáva z troch častí. Prvá časť zabezpečuje synchronizáciu a detekciu prechodu sieťového

napätia nulou. Druhá oblasť obsahuje samotnú riadiacu časť generujúcu zapínacie impulzy pre tyristory a poslednú tretiu časť riadenia tvoria koncové spínacie obvody.



Obr. 6: Bloková schéma zapojenia riadiaceho systému. [5]

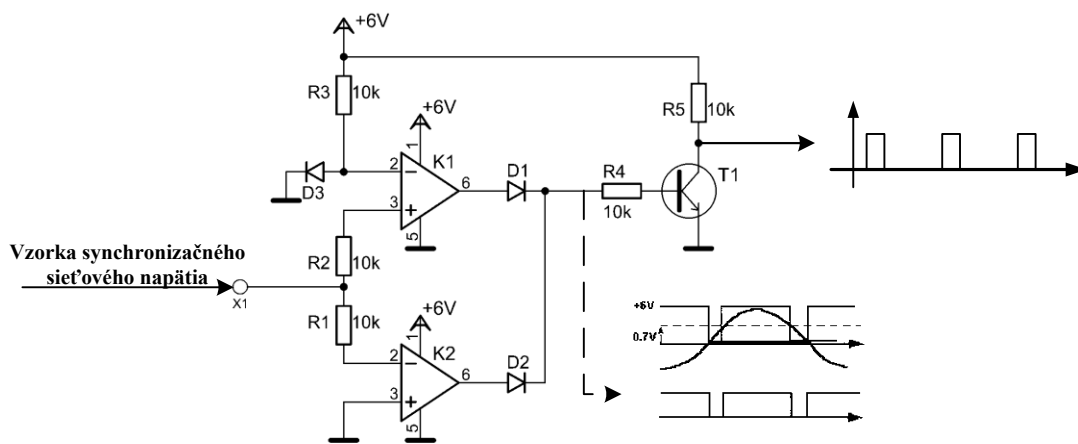
2.3.1. Detektor prechodu sieťového napätia nulou

Prvá vstupná časť celého riadenia tvorí blok detektora prechodu sieťového napätia nulou. Zo sekundárnej strany transformátora sa odoberá vzorka sieťového napätia, ktorá sa privádza do tohto bloku. Toto napätie je upravené na vhodnú úroveň. Tento blok vytvára krátke impulzy, ktoré predstavujú prechod medzi kladnými a zápornými hodnotami sieťového napätia. Tieto impulzy označujú okamih prechodu sieťového napätia nulou a synchronizujú blok riadiaceho obvodu s frekvenciou siete.

V systémoch, kde má striedavý napájací zdroj vysokú impedanciu, nesínusový prúd usmerňovača spôsobuje skreslenie sieťového napätia. Skreslenie napätia siete môže spôsobiť viacnásobné prechody nulou. To môže zapríčiniť kolísanie frekvencie týchto impulzov. V oblasti okamžikov prechodu nulou môžu vznikať zákmity, ktoré by ovplyvňovali generovanie zapínacích impulzov a mohlo by dôjsť k asymetrickému spínaniu jednotlivých tyristorov v mostíkovom usmerňovači. Aby sa zabránilo takémuto asymetrickému riadeniu, detektor prechodu nulou je tvorený komparátormi s hystereziou. Hysterezia komparátorov eliminuje zákmity a celkovo zapojenie detektora stabilizuje a synchronizuje výstupné impulzy s frekvenciou napájacieho napätia.

Ako príklad zapojenia takéhoto detektora je uvedený na obr. 7. Obvod je zostavený na základe obvodov analógovej a integrovanej elektroniky. Detektor pozostáva z dvoch komparátorov tvorených operačnými zosilňovačmi. Na obr. 7 je zobrazená funkcia princípu komparácie. Dolný komparátor K2 porovnáva privedenú zápornú polvlňu sieťového napätia s nulou. To znamená, že na výstupe komparátora je najvyššia úroveň napätia pri zápornej polvlne

sieťového napätia a naopak najnižšia (nulová) úroveň na výstupe pri kladnej polvlne sieťového napätia. Horný komparátor K1 porovnáva kladnú polvlnu sieťového napätia s napäťovou úrovňou 0,7 V. Túto úroveň tvorí úbytok napätia na dióde D₃. Ak sieťové napätie prekročí túto úroveň 0,7 V na výstupe komparátora K1 bude najvyššia úroveň napätia resp. saturačné napätie komparátora, inak bude na výstupe najnižšia (resp. nulová) úroveň napätia. Vstupy oboch komparátorov sú vedené cez dve diódy D₁, D₂, ktoré tvoria zapojenie logického člena OR. Celkový výstup je invertovaný. Tranzistor T₁ nám celkový výstup z komparátorov invertuje a získavame tak krátky impulz, ktorý je synchronizovaný s prechodom sieťového napätia nulou. Obr. 9a zobrazuje priebeh sieťového napätia a výstup z detektora prechodu nulou. [5]



Obr. 7: Detektor prechodu sieťového napätia nulou. [5]

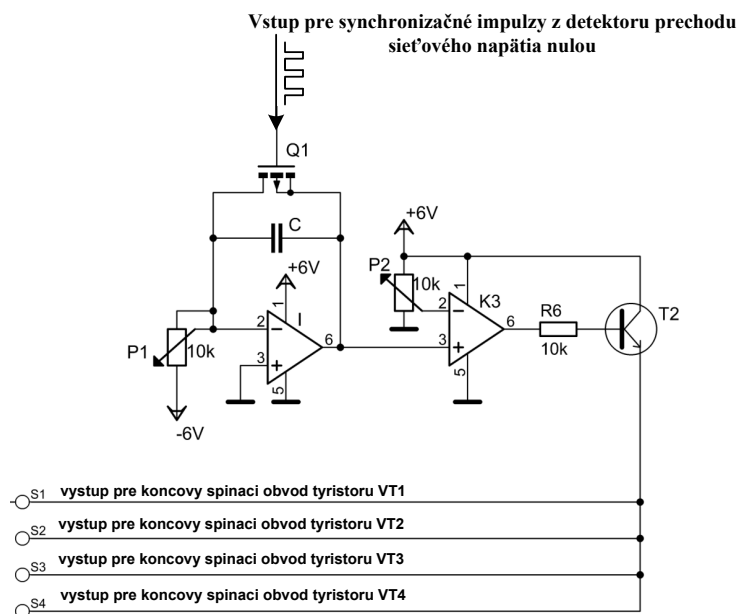
2.3.2. Generátor spínacích impulzov

Ďalšou fázou riadiaceho systému je blok generátora impulzov generujúci zapínacie impulzy pre tyristory. Tento obvod využíva impulzy z detektora prechodu nulou na pravidelné generovanie pílovitého napätia U_p .

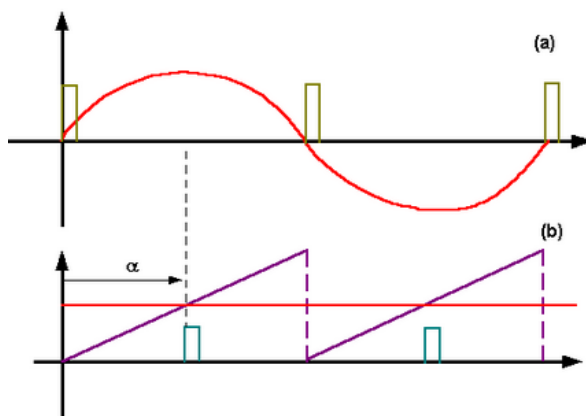
Príklad zapojenia generátora je uvedený na obr. 8. Napájacie napätie zdroja $-6V$ je privedené na vstup integrátora I, cez trimer, ktorým sa dá nastaviť maximálna hodnota napätia píly. Kondenzátor sa nabíja a lineárne integruje konštantne zvyšujúce sa napätie na výstup integrátora. Každým prechodom sieťového napätia nulou sa z detektora generuje impulz, ktorý spína MOSFET tranzistor pracujúci ako spínač a ten ďalej skratuje kondenzátor. To spôsobí vybíjanie kondenzátora cez odpor zopnutého MOSFET tranzistora. Napätie na kondenzátore sa zníži takmer na nulu. Zánikom impulzu z detektora MOSFET vypne a kondenzátor sa začne nabíjať opäť konštantným lineárnym napätím. Pravidelným opakovaním tohto procesu dostávame periodické pílovité napätie U_p s frekvenciou odpovedajúcej dvojnásobku základnej harmonickej.

Na obr. 9b vidíme ako sa napätie píly z výstupu integrátora porovnáva v komparátore K3 s referenčným napätím. Referenčné napätie je možné nastavovať a meniť pomocou potenciometra

P2. Nastavená úroveň napätia potom zodpovedá nastavenému uhlu riadenia α . Na základe tejto komparácie pílomitého napätia s referenčným dostávame na výstupe riadiace impulzy, ktoré sú zosilnené cez koncové spínacie obvody a tie ďalej spínajú jednotlivé tyristory. [5]



Obr. 8: Generátor spínacích impulzov. [5]



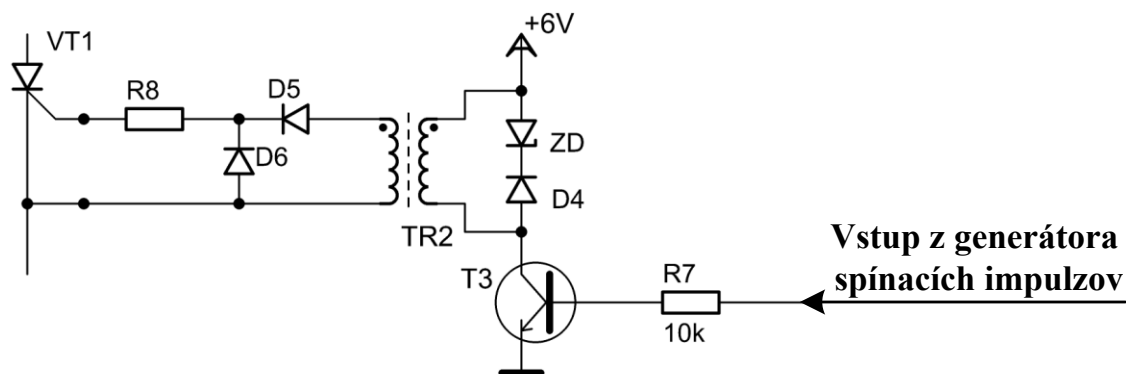
Obr. 9: Priebehy detektora a generátora impulzov,

- a) harmonické sieťové napätie a impulzy charakterizujúce prechod tohto napätia nulou,
b) synchronizované napätie píly s vyhodnotenými riadiacimi impulzmi. [5]

2.3.3. Koncové spínacie obvody

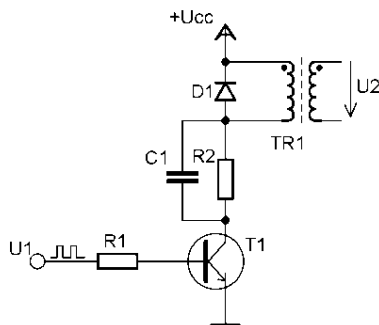
Poslednú časť z obr. 6 tvorí blok koncových spínacích obvodov. Tieto obvody pozostávajú zo štyroch impulzných transformátorov prenášajúcich zapínacie impulzy medzi hradlo a katódu tyristorov. Všetky impulzné transformátory sú riadené súčasne z jedného generátora zapínacích impulzov. To znamená, že na tyristory sú privedené zapínacie impulzy súčasne, ale zopnutie nastane len u tých tyristorov, na ktorých nie je záverne sieťové napätie.

Spínacie obvody výkonovo upravujú a tvarujú signál pre spínanie tyristorov a podľa potreby zaisťujú galvanické oddelenie výkonovej časti usmerňovača od obvodov generujúcich spínacie impulzy. Galvanické oddelenie môže byť realizované pomocou impulzného transformátora alebo optočlenu. Použitie samotného impulzného transformátora bez ochranných prvkov môže spôsobiť množstvo problémov. Zánikom privedeného impulzu potrebujeme dosiahnuť rýchly útlm magnetizačného prúdu, ďalej potrebujeme zabezpečiť ochranu hradlového prechodu tyristora proti závernému napätiu a vytvoriť možnosť prenosu jedného impulzu obmedzenej šírky. Príklad riešenia týchto problémov môžeme vidieť a základnom zapojení na obr. 10. Koncový tranzistor T_3 sa spína privedením impulzu do báze. Emitorový prúd je tvorený zložkou magnetizačného prúdu a transformovanou zložkou prúdu hradla i_G , ktorý preteká sekundárnym vinutím. Vypnutím tranzistoru T_3 sa impulzný transformátor demagnetizuje na primárnej strane obvodom demagnetizačnej diódy D_4 . K nej je sériovo zaradená Zenerová dióda ZD , ktorá svojim záverným napätím prispieva k urýchleniu tohto deja. [3]



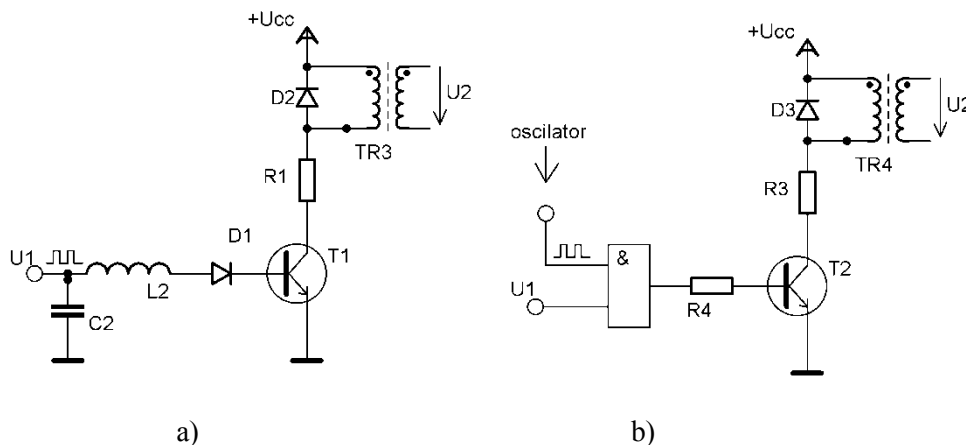
Obr. 10: Spínací obvod so zenerovou a demagnetizačnou diódou. [3]

Praktickou úpravou tohto základného riešenia dostaneme obvod na obr. 11. Odpor R_2 má ochrannú funkciu pri nasycovaní jadra transformátora. Kondenzátor C_1 zabezpečuje nábežnú špičku napätia U_2 na sekundárnej strane a tiež aj prúdu hradla. [3]



Obr. 11: Úprava primárnej časti impulzného transformátora. [3]

V aplikáciách, kde potrebujeme generovať impulz od požadovaného okamihu zopnutia po celú dobu vedenia, alebo aspoň do uhlu vedenia 90° elektrických. Pre takýto prípad je nutné na tyristor privádzať sériu impulzov s dostatočne vysokou frekvenciou spínania. Na obr. 12 je zobrazené riešenie s využitím LC oscilátoru alebo modulátoru. [3]

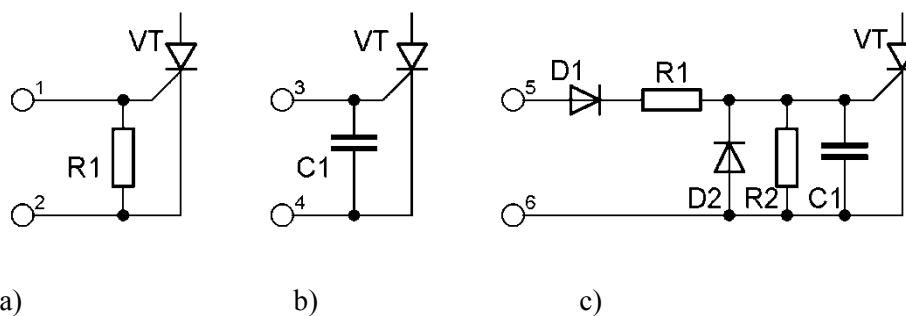


Obr. 12: Koncové spínacie obvody pre spínanie tyristorov sériou impulzov,

a) s LC oscilátorom,

b) s moduláciou externým oscilátorom. [3]

Veľmi dôležité pre spínanie tyristoru sú ochranné obvody zapojené medzi sekundárne vinutie impulzného transformátora a obvod riadiacej elektródy tyristora. [3]



Obr. 13: Ochranné obvody riadiacej elektródy tyristoru,

a) s odporom,

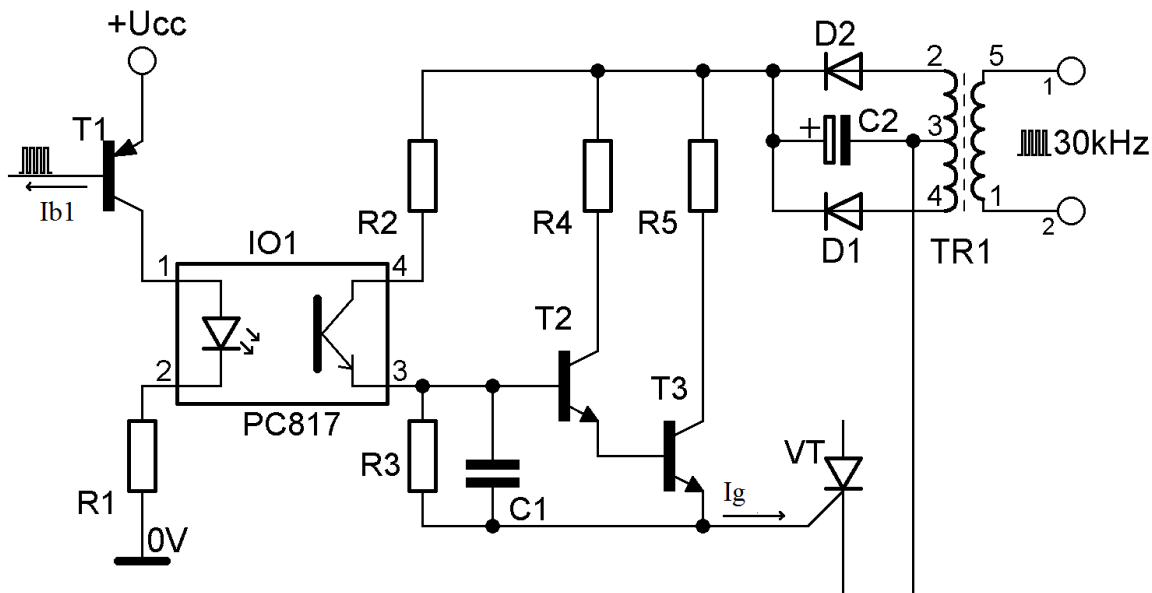
b) s kondenzátorom,

c) riešenie pre použitie pre priemyselne aplikácie. [3]

V aplikáciách, kde môže prúd behom jedného zopnutia tyristoru niekoľkokrát poklesnúť na nulu alebo tam, kde sa vyžaduje vysoká odolnosť proti elektromagnetickému rušeniu sa používajú na prenos riadiacich impulzov optoelektronické väzby.

Spínací obvod vyžaduje napájací zdroj s parametrami odpovedajúcimi požiadavkám pre správne riadenie použitého tyristoru. Tento zdroj obvykle využíva vyššie frekvencie napájacieho napätia, čo umožňuje minimalizovať rozmery a zvýšiť jeho účinnosť. V schéme zapojenia spínacieho obvodu tyristoru na obr. 14 nastavuje R_1 prúd diódy optočlenu, odpory R_2 a R_3

s kondenzátorom C_1 určujú pracovný bod a dynamické vlastnosti optoelektronickej väzby. Signál je zesilnený dvojstupňovým zosilňovačom tvoreným tranzistormi T_2 , T_3 a odpormi R_4 , R_5 . Prúd riadiacej elektródy je nastavený odporom R_5 . [3]



Obr. 14: Spínači obvod tyristoru s optoelektronickou väzbou. [3]

2.4. Riadiace obvody s integrovanými obvodmi

Na zostavenie riadiacich obvodov pre fázové riadenie je najvhodnejšie použiť monolitické integrované obvody. Sú to polovodičové stavebné súčiastky, ktoré majú väčšiu časť riadiaceho obvodu umiestnenú na jednej kremíkovej dosičke. Príklad niektorých integrovaných obvodov určených pre fázové riadenie tyristorov a trakov vyrábaných spoločnosťou ATMEL je uvedený v tab. 1.

Tab. 1: Prehľad niektorých obvodov určených pre fázové riadenie. [4]

| TYP | Púzdro | Výstupný prúd I_Q (mA) | Niektoré z vlastností |
|--------|--------|-----------------------------|---|
| U209B | DIP14 | 155 | softstart, sledovanie signálu z tachodynamu |
| U211B | DIP18 | 155 | softstart, prúdová kontrola, sledovanie signálu z tachodynamu, limitácia rýchlosti otáčok |
| U2008B | DIP8 | 125 | použitie minimálneho počtu externých súčiastok, prúdová kontrola |
| U2010B | DIP16 | 125 | softstart, prúdová kontrola |

Tab. 2: Porovnávanie riadiacich obvodov s diskretnými a integrovanými odvodmi. [1], [2]

| | VYHODY | NEVYHODY |
|----------------------------------|---|---|
| Diskrétné polovodičové súčiastky | <ul style="list-style-type: none"> Možnosť zostaviť akýkoľvek riadiaci obvod v optimálnom zapojení Možnosť zostaviť veľmi jednoduché jednofázové obvody pre ručné riadenie Jednoduché riadiace a spínacie obvody sú lacné Ľahká dostupnosť Jednoduchá a lacná technológia súčiastok Takmer ľubovoľný výkon výstupných obvodov | <ul style="list-style-type: none"> Obvody pre náročnejšie funkcie a viacfázové zapojenia sú zložité a drahé Zložité hľadanie porúch v zložitých obvodoch Riadiace obvody vychádzajú rozmernejšie a majú väčšiu hmotnosť Väčší príkon riadiacich obvodov, čo znamená pre hromadnú výrobu veľké náklady |
| Integrované obvody | <ul style="list-style-type: none"> Na jednej kremíkovej dosičke sú celé funkčné celky Nízke náklady pri sériovej výrobe Jednoduchá a lacná výroba riadiacich obvodov Malé rozmery a hmotnosť obvodov Veľká spoľahlivosť Nízky príkon aj v zložitých zapojeniach V hybridnom zapojení sa môžu spojiť vlastnosti diskretných i monolitických súčiastok | <ul style="list-style-type: none"> Obmedzená výkonová zaťažiteľnosť v motolotickom prevedení Vysoké náklady pri výrobe malého počtu kusov Malá preťažiteľnosť Menšia šumová imunita Sú menej univerzálne pre lacné a funkčné nenáročné aplikácie |

Tieto integrované obvody doplnené niekoľkými pasívnymi súčiastkami (kondenzátormi, nastavovacím potenciometrom, izolačným transformátorom, prípadne ďalšími súčiastkami) môžu pracovať v jednoduchých zariadeniach s ručným nastavovaním výstupného napätia, ale aj v zariadeniach, kde sa sledovaná veličina riadi automaticky. Prednosti riadiacich obvodov tvorených pomocou integrovaných obvodov oproti obvodom zostavených s diskretných súčiastok, môžeme vidieť v tab. 2. Z porovnávania vlastností vyplýva, že diskretné polovodičové

súčiastky sú vhodné pre zariadenia nesériového charakteru, aplikáciám, kde nie je treba zaistiť zložitejšie funkcie (napr. automatickú reguláciu, riadenie trojfázových spotrebičov atď.) a tiež tam, kde je potrebný jednoduchý zdroj výkonových riadiacich impulzov. [1], [2]

Podľa spôsobu napájania môžeme integrované obvody rozdeliť do dvoch skupín:

- **Integrované obvody so závislým napájaním**

Ich súčasť tvorí usmerňovač (prípadne aj stabilizátor), ktorý dodáva jednosmerné napätie všetkým ostatným obvodom. Zdroj striedavého napájacieho napätia je spoločný pre výkonový (silový) tak aj pre integrovaný obvod; obidva obvody sú potom v prevádzke navzájom galvanicky prepojené. Do tejto skupiny patria integrované obvody určené k riadeniu výkonu hlavne pre jednofázové spotrebiče. Použitie vo viacfázových striedavých obvodoch riadených usmerňovačov je možné, ale je komplikované, hlavne keď požadujeme automatické udržiavanie regulovanej veličiny.

- **Integrované obvody s nezávislým napájaním**

K napájaniu integrovaných obvodov slúži samostatný zdroj jednosmerného napätia. Takáto možnosť realizácie komplikuje a vytvára vyššie náklady pre jednoduché, prevažne jednofázové zariadenia. Výhodné sú pre viacfázové aplikácie, pretože jednotlivé integrované obvody je možné jednoduchšie vzájomne galvanicky prepojiť. Tieto integrované obvody môžeme použiť v zariadeniach s ručným riadením, ale aj pre zariadenia s automatickou reguláciou.

V súčasnosti existuje niekoľko druhov dodávaných IO, ktorých vlastnosti môžeme zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- charakterom nezávislého riadiaceho obvodu,
- napájané sú usmerneným a vyfiltrovaným napätím,
- generujú unipolárne riadiace impulzy konštantnej veľkosti, ktoré sú nezávislé na nastavení uhlu riadia,
- zo siete si berú vzorku synchronizačného napätia,
- sú vybavené monitorovacím obvodom pre sledovanie veľkosti napätia na riadenej súčiastke. [1], [2]

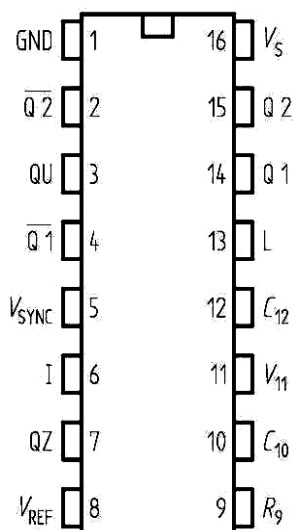
V nasledujúcej časti bude popis vybraného typu týchto súčasne vyrábaných integrovaných obvodov. Jedná sa o riadiaci obvod TCA 785 vyrábaný firmou Siemens, ktorá patri medzi významných výrobcov polovodičovej a priemyselnej elektroniky.

3. Realizácia riadiacej jednotky tvorenej integrovaným obvodom TCA 785

Na realizáciu riadiaceho obvodu mi bol doporučený integrovaný obvod TCA 785. Tento obvod má široké spektrum svojho využitia. Možno ho použiť na riadenie triakov, tranzistorov a tyristorov. Je pomerne ľahko dostupný na trhu. Vhodnou voľbou zapojenia týchto viacerých obvodov môžeme riadiť aj viacfázové sústavy. Veľkou výhodou obvodu je schopnosť pracovať v širokom spektre prevádzkových teplôt, čo nám umožňuje použitie aj v náročných aplikáciách. Riadiaci obvod tvorí základ celej riadiacej časti usmerňovača. V použitej aplikácii riadiaceho obvodu jednofázového riadeného usmerňovača bol použitý jeden integrovaný obvod vyššie uvedeného typu. Riadiaci obvod je zostavený podľa doporučeného zapojenia, ktoré je uvedené v katalógu integrovaného obvodu s niekoľkými úpravami. Úpravy zapojenia sa týkajú hlavne nezávislého napájania integrovaného obvodu, čo má za výhodu oddelenie výkonovej (silovej) časti od riadiaceho obvodu. Ďalšou zmenou je oddelenie riadiacich impulzov privedených k jednotlivým riadiacim elektródam tyristorov výkonovej časti. Prenos jednotlivých riadiacich impulzov do riadiacich elektród tyristorov je realizovaný pomocou oddeľovacích impulzných transformátorov.

3.1. Popis použitého integrovaného obvodu TCA 785

Monoliticky analógový integrovaný obvod TCA785 má 16 vývodových pinov. Na obr. 15 je zobrazené rozmiestnenie jednotlivých pinov integrovaného obvodu. Púzdro je typu P – DIP – 16 – 1 a má 16 vývodových pinov. [6]



Obr. 15: Rozmiestnenie jednotlivých pinov IO TCA 785. [6]

V zapojení a pri samotnej realizácii neboli využité všetky dostupné piny. Prehľad všetkých dostupných pinov, označenie a ich význam je v tab. 3.

Tab. 3: Symboly a funkcie jednotlivých pinov integrovaného obvodu. [6]

| Pin | Symbol | Funkcia |
|-----|-------------------|---|
| 1 | GND | Uzemnenie |
| 2 | $\overline{Q2}$ | Výstup 2 negovaný |
| 3 | QU | Výstup U |
| 4 | $\overline{Q1}$ | Výstup 1 negovaný |
| 5 | V_{SYNC} | Synchronizačné napätie |
| 6 | I | Prerušenie (blokuje všetky výstupy ak tento vstup uzemníme) |
| 7 | QZ | Výstup Z |
| 8 | V_{REF} | Stabilizované napätie (poskytuje stabilizované napätie 3,1 V) |
| 9 | R_9 | Odpor píly (trimer – nastavenie amplitúdy píly $20 < R_9 < 500k$) |
| 10 | C_{10} | Pin pre privedenie kapacity na generovanie píly ($500pF < C_{10} < 1\mu F$) |
| 11 | V_{11} | Riadiace napätie |
| 12 | C_{12} | Pripojená kapacita určuje dĺžku výstupného impulzu |
| 13 | L | Dlhý impulz |
| 14 | Q1 | Výstup 1 |
| 15 | Q2 | Výstup 2 |
| 16 | V_S | Napájacie napätie |

Obvod má viacero vlastností, tie najdôležitejšie sú nasledovné

- odolnosť voči rušeniu,
- spoľahlivá funkcia detektora prechodu nulou,
- rozsiahle možnosti použitia,
- použitie ako detektor prechodu sieťového napätia nulou,
- vnútorná spotreba prúdu, iba 5 mA,
- možnosť súčasného prerušenia všetkých výstupov (pin6),
- dĺžka trvania výstupného impulzu je určená kapacitou externého kondenzátora (pin12). [6]

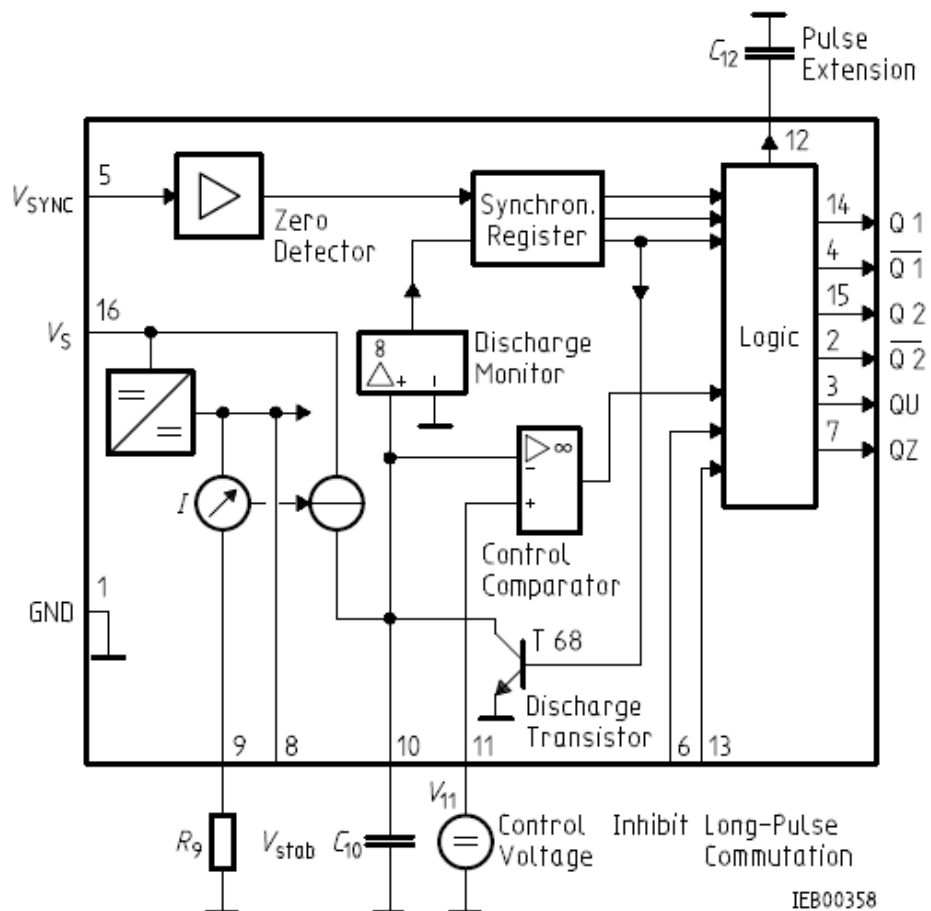
Tab. 4: Technické parametre obvodu TCA785. [6]

| | |
|--|--|
| Napájacie napätie V_S (pin16) | 8 - 18 V DC |
| Pracovná frekvencia f | 10 – 500 Hz |
| Prevádzková teplota T_a | -25 – 85 °C |
| Riadiace napätie (pin11) | 2 – 15 V |
| Prúdový odber (bez záťaže) | 5 – 10 mA |
| Vstupný prúd I_{sef} pre synchronizačný vstup (pin5) | $30 < I_{sef} < 200 \mu A$ |
| Štandardná dĺžka trvania impulzu t_p s kondenzátorom C_{12} | 620 $\mu s/nF$ |
| Nabíjací prúd I_{10} kondenzátora C_{10} | $I_{10} = \frac{V_{REF} \cdot 1,25}{R_9}$ |
| Časová konštanta nabíjania kondenzátora C_{10} | $t_{Tr} = \frac{V_{11} \cdot R_9 \cdot C_{10}}{V_{REF} \cdot 1,25}$ |
| Hodnota napätia píly | $V_{10max} = V_S - 2V$ $V_{10} = \frac{V_{REF} \cdot t_{Tr} \cdot 1,25}{R_9 \cdot C_{10}}$ |
| Výstupný prúd | 250 mA |
| Rozsah riadiaceho uhla α | 0 – 180° |

Popis funkcie a vnútornej štruktúry IO vychádza z blokovej schémy uvedenej na obr. 16. Zo sekundárneho vinutia sieťového transformátora sa získava vzorka synchronizačného napätia V_{SYNC} , ktoré je privedené cez odpor R_5 na pin 5. Toto napätie sa privádza do detektoru nulového signálu, ktorý vyhodnocuje prechody privedeného synchronizačného napätia nulou a odosiela ich do synchronizačného registra. Synchronizačný register riadi generátor píly, kondenzátor C_{10} je nabíjaný konštantným prúdom nastavením trimrom R_9 . Nastavenému uhlu riadeniu α odpovedá riadiace napätie V_{11} , ktoré sa porovnáva s napätím píly V_{10} a ak napätie píly dosiahne riadiace napätie vygeneruje sa pulz, ktorého šírku udáva kapacita kondenzátora C_{12} . Každým prechodom synchronizačného napätia nulou sú generované pulzy s fázovým posunom v rozsahu od 0° až do 180°.

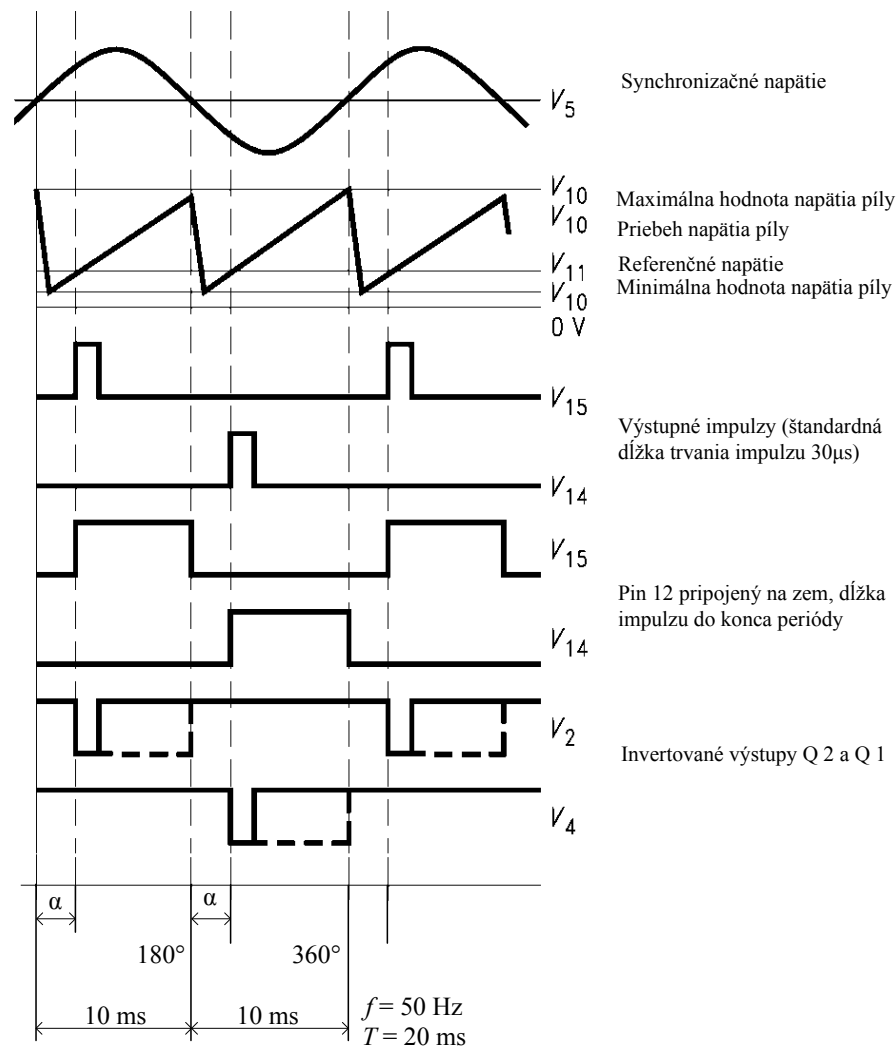
S každou polperiódou sa generuje kladný pulz s dĺžkou 1 ms, dĺžku impulzu realizuje kondenzátor C_{12} (pin12) s kapacitou 1,62 nF. V jednej polperióde sa generovaný impulz privádza na výstup Q1 (pin14) a v druhej polperióde na výstup Q2 (pin15). Úpravou kapacity C_{12} môžeme dosiahnuť impulz s dobu trvania až do jednej polperiódy. Ak však pin 12 pripojíme priamo na zem

budú sa generovať impulzy v rozsahu od 0° do 180° . Na výstupy $\overline{Q1}$ (pin 4) a $\overline{Q2}$ (pin 2) sa objavujú negované impulzy výstupov Q1 a Q2. Na pinu 3 je invertovaný signál $\alpha + 180^\circ$, ktorý sa používa na ovládanie externého zariadenia. Z výstupu QZ (pin 7) dostávame signál odpovedajúci logickej funkcii NOR výstupov Q1 a Q2. Prerušenie všetkých výstupov Q1, Q2, $\overline{Q1}$ a $\overline{Q2}$ zabezpečíme vstupným signálom privedeným na pin 6. Pin 13 sa používa k predĺženiu impulzov na výstupoch $\overline{Q1}$ a $\overline{Q2}$ na celú dĺžku impulzu ($180^\circ - \alpha$). [6]



Obr. 16: Bloková schéma integrovaného obvodu TCA 785. [6]

Zobrazenie teoretických priebehov jednotlivých signálov IO, ktoré uvádza výrobca v katalógu IO lit.[6], môžeme vidieť na obr. 17. Prvý priebeh zobrazuje napätie siete, ktoré predstavuje synchronizačné napätie. Prechodom tohto napätia nulou sa resetuje napätie píly. Na pinu V_{10} dostávame pílovité napätie, ktoré je v komparátore porovnávané s referenčným napätím na pinu V_{11} . Na základe tejto komparácie dostávame na výstupe Q2 (pin 15) a Q1 (pin 14) riadiace impulzy určitej šírky, ktorá závisí od veľkosti kapacity pripojenej na pin 12. Ďalšie dva priebehy zobrazujú riadiace impulzy s plnou šírkou, teda od uhla zopnutia α až po koniec periódy. Posledné dva priebehy predstavujú invertované výstupy k výstupom Q1 a Q2.



Obr. 17: Priebehy signálov integrovaného obvodu TCA 785. [6]

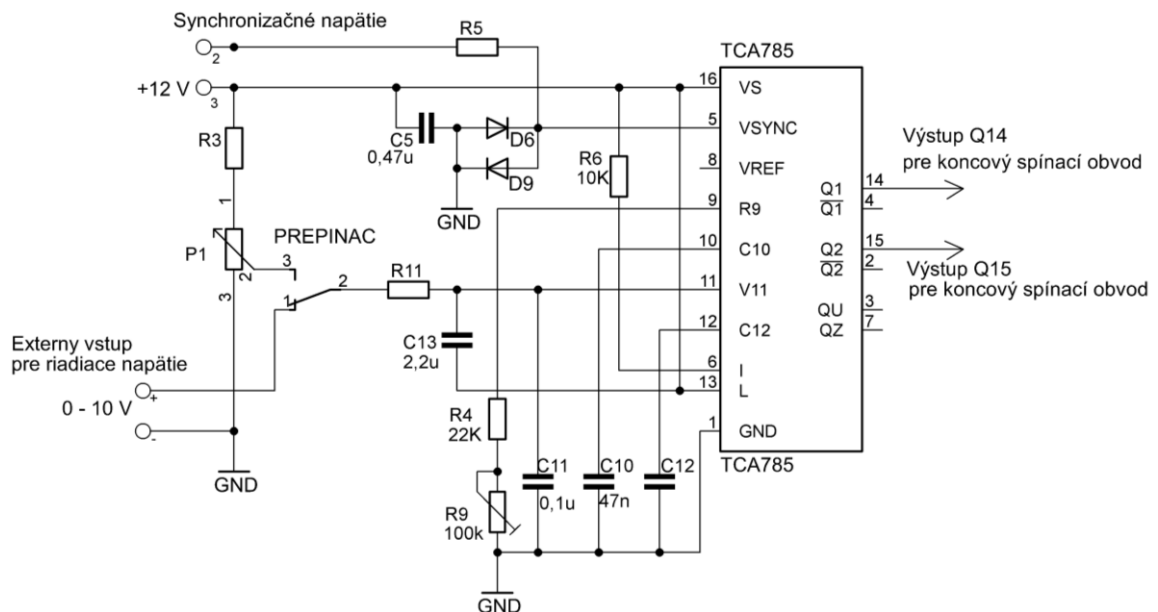
3.2. Riadiaca časť

Zapojenie riadiacej časti (obr. 18) vychádza z doporučeného zapojenia výrobcu uvedeného v katalógu integrovaného obvodu literatúry [6]. Zapojenie je upravené a do vstupnej časti pre privedenie riadiaceho napätia bol vložený prepínač. Pomocou tohto prepínača môžeme prepínať voľbu riadiaceho napätia, a to buď voľbou nastavenia pomocou potenciometra P_1 alebo prepnutím na vstup z externého zdroja. Princíp činnosti celkového riadenia bol opísaný vyššie. Napájanie zo zdroja sa privádza na svorku 3. Vzorka sieťového napätia sa privádza na svorku 2 zo sekundárneho vinutia transformátora napájacieho zdroja cez odpor R_5 . Pre výpočet odporu R_5 vychádzame z rozsahu dovolenej hodnoty prúdu I_{5ef} uvedenej v tab. 4.

$$R_5 = \frac{U_{synch(ef)}}{I_{5(ef)}} = \frac{15 \text{ V}}{150 \cdot 10^{-6} \text{ A}} = 100 \text{ k}\Omega \quad (2)$$

Kapacitu kondenzátora C_{12} pre požadovanú dĺžku impulzu $t_1 = 1$ ms určíme nasledovne

$$C_{12} = \frac{t_1}{t_p} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{ s}}{620 \cdot 10^{-6} \text{ s}} = 1,62 \text{ nF} \quad (3)$$

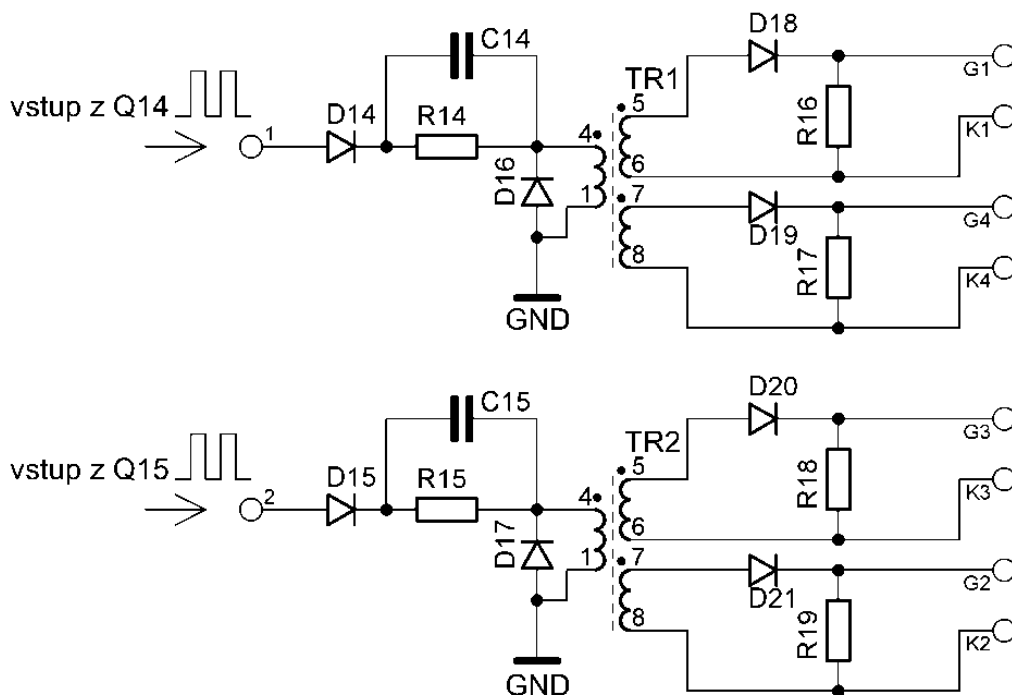


Obr. 18: Zapojenie riadiacej časti.

3.3. Koncové spínacie obvody riadiacej jednotky

Charakteristika takýchto obvodov je uvedená v podkapitole 2.3.3 tejto práce. Vzhľadom k tomu, že obidva spínacie obvody sú identické nasledujúci popis sa bude týkať len jedného z nich. Popis je vytvorený na základe poznatkov uvedených v literatúre [9], [10]. Z výstupu Q14 riadiaceho obvodu TCA 785 sú privedené kladné impulzy s periódou $T = 20$ ms cez diódu D_{14} na primárne vinutie impulzného transformátora TR1. V tejto dobe primárnym vynútením prechádzajú dve zložky prúdu. Prvá je stála činná zložka (transformovaná do záťaže) o stálej hodnote, a druhú zložku tvorí magnetizačný prúd, ktorý vyvolá indukčný tok. Ten kryje všetky straty vytvorené v súvislosti s magnetovaním. To znamená, že v tejto časti periódy magnetizačný prúd v primárnom vinutí narastá. V dobe kedy dôjde k zániku kladného impulzu z výstupu Q14, zmení napätie na sekundárnej strane polaritu. Zmena polarít napätia na vinutiach súvisí s poklesom magnetizačného prúdu a tým aj s poklesom indukčného toku. V tomto intervale diódy D_{20} a D_{21} slúžia ako izolácia transformátora od obvodov hradla tyristorov. Dióda D_{16} demagnetizuje impulzný transformátor v dobe, kde riadiaci obvod nevysiela žiaden impulz. To znamená, že v dobe keď zanikne privedený impulz a zmenia sa napätia na vinutiach transformátora na opačnú polaritu, tým sa vytvorí cesta pre magnetizačný prúd cez túto diódu D_{16} . Magnetická indukcia klesne na počiatočnú hodnotu. Odpor R_{14} slúži k obmedzeniu veľkosti primárneho

prúdu. Kondenzátor C_{14} zabezpečuje vytvorenie nábežnej krátkej špičky ako u napät'ového, tak aj u prúdového impulzu na sekundárnej strane transformátora.



Obr. 19: Koncové spínacie obvody riadiacej jednotky.

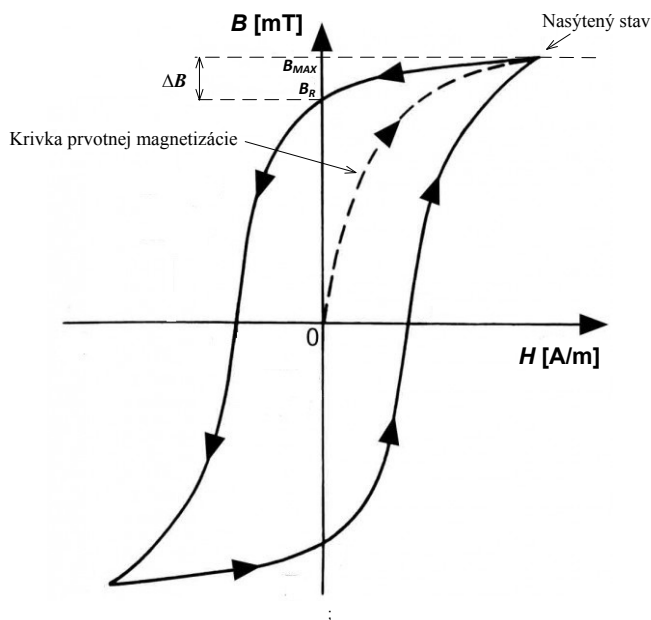
3.3.1. Návrh impulzného transformátora

Ako súčasť koncových spínacích obvodov sú dva impulzné transformátory. Každý z nich je súčasťou koncových spínacích obvodov, a tie sú ďalej pripojené k výstupom Q15 (pin15) a Q14 (pin14) riadiacej časti obvodu. Transformátory sú identické čo sa týka parametrov, preto nasledujúci popis sa vzťahuje len na jeden z nich. Návrh je vytvorený na základe poznatkov literatúry [9], [10].

Uvedený impulzný transformátor zabezpečuje galvanické oddelenie výstupnej časti riadiaceho obvodu od obvodu riadiacej elektródy tyristora. Jadro transformátora je tvorené feritovým jadrom typu E. Feritové jadra sa vyznačujú malou maximálnou hodnotou sýtenia, ktorá sa udáva v rozsahu od 0,2 do 0,4 T. Celý návrh je postavený na základe podmienky podľa ktorej by nemalo dôjsť k presýteniu magnetického obvodu. Ak sa tak stane a dôjde k prekročeniu maximálneho sýtenia magnetického obvodu B_{\max} , dochádza pri malej zmene magnetickej indukcie ΔB ku veľkej zmene intenzity magnetického poľa, čo vidieť na obr. 20.

Takouto veľkou zmenou intenzity magnetického poľa dôjde k zmenšeniu permeability materiálu. Pokles permeability materiálu spôsobí pokles relatívnej permeability. Následným zmenšením relatívnej permeability dôjde k zmenšeniu indukčnosti primárneho vinutia

transformátora, čo môže mať za následok vyvolanie nárastu magnetizačného prúdu i_μ . Veľký nárast magnetizačného prúdu je nežiaducim javom a môže spôsobiť poškodenie polovodičových súčiastok.



Obr. 20: Hysterezná slučka a krivka prvotnej magnetizácie magneticky mäkkého materiálu.

Navrhovaný transformátor má jedno primárne a dve sekundárne vinutia. Musí byť schopný prenášať impulzy s požadovanými parametrami. Šírku prenášaného impulzu som zvolil na $t_1 = 1$ ms, pričom pulzy sú z riadiaceho obvodu vysielané s frekvenciou $f = 50$ Hz, čomu odpovedá perióda $T = 0,02$ s. Prenášaný výkon je nízky a straty sú zanedbateľné. Napätie na vstupnom primárnom vinutí $U_{PRIM1} = 10$ V, výstupné napätie na jednom sekundárnom vinutí $U_{SEK1} = 2$ V, výstupný prúd $I_{SEK1} = 50$ mA. Druhé sekundárne vinutie má rovnaké parametre, a preto nasledujúci návrh sa bude týkať jedného transformátora s jedným primárnym a jedným sekundárnym vinutím.

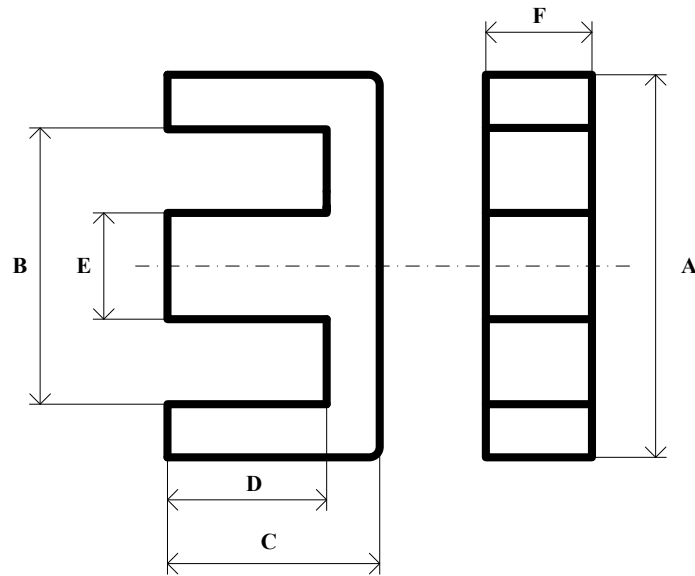
Z katalógu od firmy Semic bolo vybrané feritové jadro typu E s označením Lj E2507 CF138.

Tab. 5: Technické parametre použitého jadra Lj E2507 CF138. [8]

| l_e [mm] | S_e [mm ²] | A_L [nH] | B_R [mT] | B_{max} [mT] |
|------------|--------------------------|------------|------------|----------------|
| 57,5 | 52,5 | 1900 | 180 | 480 |

Tab. 6: Rozmery jadra. [8]

| Rozmer strán | A | B | C | D | E | F |
|--------------|----|------|------|-----|-----|-----|
| Dĺžka [mm] | 25 | 17,5 | 12,8 | 8,7 | 7,5 | 7,5 |



Obr. 21: Feritové jadro typu E s označením Lj E2507 CF138. [8]

Počet závitov primárneho vinutia určíme z nasledujúceho vzťahu

$$N_1 = \frac{U_{PRIM1} \cdot t_1}{\Delta B \cdot S_e} = \frac{U_{PRIM1} \cdot t_1}{(B_{max} - B_R) \cdot S_e} = \frac{10 \text{ V} \cdot 0,001 \text{ s}}{(0,48 \text{ T} - 0,18 \text{ T}) \cdot 52,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 634,9 \text{ záv} \quad (4)$$

Počet závitov po zaokrúhlení $N_1 = 635 \text{ záv}$

Napäťový prevod transformátora

$$n = \frac{U_{PRIM1}}{U_{SEK1}} = \frac{10 \text{ V}}{2 \text{ V}} = 5 \quad (5)$$

Počet závitov sekundárneho vinutia

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{U_{SEK1}}{U_{PRIM1}} = 635 \cdot \frac{2 \text{ V}}{10 \text{ V}} = 127 \text{ záv} \quad (6)$$

Overenie sýtenia jadra

$$\Delta B = \frac{U_{SEK1} \cdot t_1}{N_2 \cdot S_e} = \frac{2 \text{ V} \cdot 0,001 \text{ s}}{127 \cdot 52,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 0,299 \text{ T} \quad (7)$$

Výsledná hodnota je vyhovujúca, pretože neprekračuje maximálnu hodnotu sýtenia materiálu jadra.

Celkový primárny prúd I_{PRIM1} pozostáva z dvoch nezávislých zložiek. Jednu zložku tvorí stála činná zložka prúdu I'_{PRIM1} (transformovaná do záťaže) a druhú zložku tvorí magnetizačný prúd.

$$I_{PRIM1} = I'_{PRIM1} + I_{\mu max} \quad [A; A; A] \quad (8)$$

Výstupný prúd sekundárneho vinutia sme stanovili na hodnotu $I_{SEK1} = 50 \text{ mA}$, pomocou prevodu môžeme určiť pretransformovaný prúd I'_{PRIM1} .

$$I'_{PRIM1} = I_{SEK1} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 0,05 \text{ A} \cdot \frac{127}{635} = 0,01 \text{ A} \quad (9)$$

Indukčnosť primárneho vinutia môžeme vyjadriť nasledovne

$$L_{1TR1} = N_1^2 \cdot A_L \quad [\text{H}; \text{nH}] \quad (10)$$

$$L_{1TR1} = N_1^2 \cdot A_L = 635^2 \cdot 1900 \cdot 10^{-9} \text{ H} = 0,766 \text{ H} \quad (11)$$

Na základe vyjadrenej indukčnosti primárneho vinutia môžeme určiť maximálnu hodnotu magnetizačného prúdu

$$I_{\mu \max} = \frac{U_{PRIM1} \cdot t_1}{L_{1TR1}} \quad [\text{A}; \text{V}; \text{s}; \text{H}] \quad (12)$$

$$I_{\mu \max} = \frac{10 \text{ V} \cdot 0,001 \text{ s}}{0,766 \text{ H}} = 0,013 \text{ A} \quad (13)$$

Vyjadrenie celkového primárneho prúdu

$$I_{PRIM1} = I'_{PRIM1} + I_{\mu \max} = 0,01 \text{ A} + 0,013 \text{ A} = 0,023 \text{ A} \quad (14)$$

Vyjadrenie efektívnej hodnoty prúdov I_{PRIM1} a I_{SEK1}

$$I_{PRIM1(ef)} = I_{PRIM1} \cdot \sqrt{\frac{t_1}{T}} = 0,023 \text{ A} \cdot \sqrt{0,05} = 5,14 \cdot 10^{-3} \text{ A} \quad (15)$$

$$I_{SEK1(ef)} = I_{SEK1} \cdot \sqrt{\frac{t_1}{T}} = 0,1 \text{ A} \cdot \sqrt{0,05} = 22,36 \cdot 10^{-3} \text{ A} \quad (16)$$

Potrebné prierezy vodičov primárneho a sekundárneho vinutia určíme ako podiel efektívnej hodnoty prúdov a zvolenej prúdovej hustoty $J_1 = 1,5 \text{ A/mm}^2$ a $J_2 = 2,5 \text{ A/mm}^2$.

$$S_{PRIM1cu} = \frac{I_{PRIM1(ef)}}{J_1} = 0,003426 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (17)$$

$$S_{SEK1cu} = \frac{I_{SEK1(ef)}}{J_2} = 0,008944 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (18)$$

Na základe vypočítaných prierezov vodičov môžeme určiť čisté (bez izolácie) priemery vodičov

$$d_{PRIM1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{PRIM1cu}}{\pi}} = 0,066 \text{ mm} \quad (19)$$

$$d_{SEK1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{SEK1cu}}{\pi}} = 0,1 \text{ mm} \quad (20)$$

Demagnetizačnou diódou prechádzajú jednotlivé zložky prúdov

Pre maximálnu hodnotu prúdu prechádzajúceho diódou platí

$$I_{Demag} = I_{\mu \max} = \frac{10 \text{ V} \cdot 0,001 \text{ s}}{0,766 \text{ H}} = 0,013 \text{ A} \quad (21)$$

Strednú hodnotu tohto prúdu vyjadríme ako

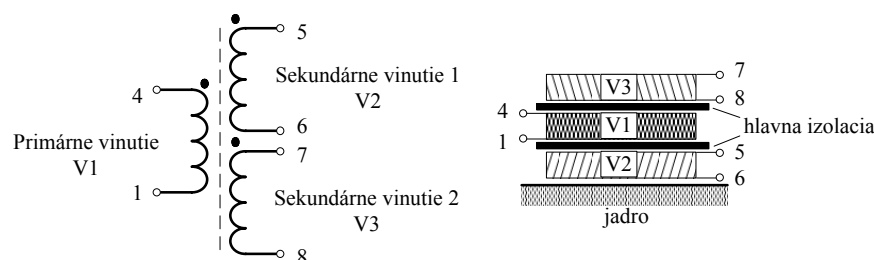
$$I_{Demag(AV)} = \frac{1}{2} \cdot I_{Demag} \cdot \frac{t_1}{T} = \frac{1}{2} \cdot 0,013 \text{ A} \cdot 0,05 = 0,325 \cdot 10^{-3} \text{ A} \quad (22)$$

Aby sa dosiahli požadované parametre a spresnili výsledky samotného návrhu transformátora, bolo potrebné experimentálne skúšať rôzne prevedenia vinutí. Overovať funkciu, kontrolovať sytenie jadra, kontrolovať vstupné a výstupné veličiny atď. Na základe týchto skúšok a meraní sa získali údaje pre konečné spracovanie samotnej realizácie. V konečnom prevedení boli niektoré navrhnuté parametre upravené. Úprava sa týka hlavne priemeru vodiča primárneho vinutia, kde z dôvodu dostupnosti použitého vodiča bolo toto vinutie navinuté vodičom s priemerom 0,08 mm. Podľa tejto úvahy a návrhu boli vytvorené dva požadované transformátory TR1 a TR2. Prehľad parametrov potrebných pre realizáciu oboch transformátorov zobrazuje tab. 7.

Tab. 7: Technické údaje zhotoveného transformátora.

| VINUTIE | Počet závitov N | Čistý priemer drôtu d (mm) |
|--------------|-------------------|------------------------------|
| Primárne | 635 | 0,08 |
| Sekundárne 1 | 128 | 0,1 |
| Sekundárne 2 | 128 | 0,1 |

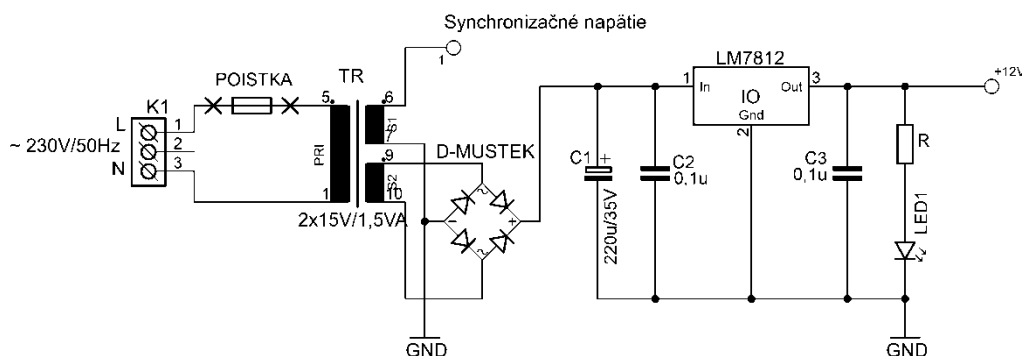
Prevedenie a usporiadanie jednotlivých vinutí transformátora je zobrazené na obr. 22. Vinutia sú navinuté v niekoľkých vrstvách. Závitov som navíjal ručne, pričom som sa snažil dodržať pravidelné usporiadanie závitov. Vinutia sú medzi sebou oddelene izolačnou vrstvou tvorenou lakovaným papierom, ktorý zabezpečuje nízke dielektrické straty a dostatočnú izolačnú pevnosť.



Obr. 22: Prehľad usporiadania jednotlivých vinutí zhotoveného transformátor

3.4. Napájanie riadiaceho obvodu

Napájanie riadiaceho obvodu zabezpečuje napájací zdroj. Celý napájací modul je zobrazený na obr. 23. Zapojenie vychádza zo základného zapojenia stabilizovaného zdroja. Transformátor TR má jedno primárne a dve sekundárne vinutia. V primárnom obvode je zaradená poistka proti skratu. Po transformácii sieťového napätia je napätie zo sekundárneho vinutia usmernené mostíkovým usmerňovačom a následne vyfiltrované kondenzátorom C_1 . Za ním nasleduje integrovaný stabilizátor napätia LM7812, ktorý zabezpečuje na výstupe stabilizované napätie. Keramické kondenzátory C_2 a C_3 slúžia k odrušeniu a zabráňujú rozkmitaniu stabilizátora. Pre tento typ stabilizátora sa uvádza maximálne povolené vstupné napätie 35V. Pre správnu funkciu obvodu je doporučené, aby na vstupe IN stabilizátora bolo napätie o 3 V väčšie ako je na výstupe OUT. K zaisteniu tejto podmienky by malo byť na sekundárnej strane transformátora najmenej 15V striedavých. Pretože je stabilizátor výkonový prvok treba zabezpečiť chladenie. Čím väčší je rozdiel napätia medzi vstupom a výstupom stabilizátora, tým je väčšia výkonová strata a obvod produkuje straty v podobe tepla. Z hľadiska správnej funkcie a spoľahlivosti treba stabilizátor umiestniť na vhodný chladič. Signalizáciu prítomnosti napätia na výstupe nám zabezpečuje LED. Priamo z výstupu druhého sekundárneho vinutia sa odoberá vzorka synchronizačného napätia, ktoré je pripojené cez odpor R_5 k riadiacemu obvodu konkrétne na pin 5 IO TCA 785.

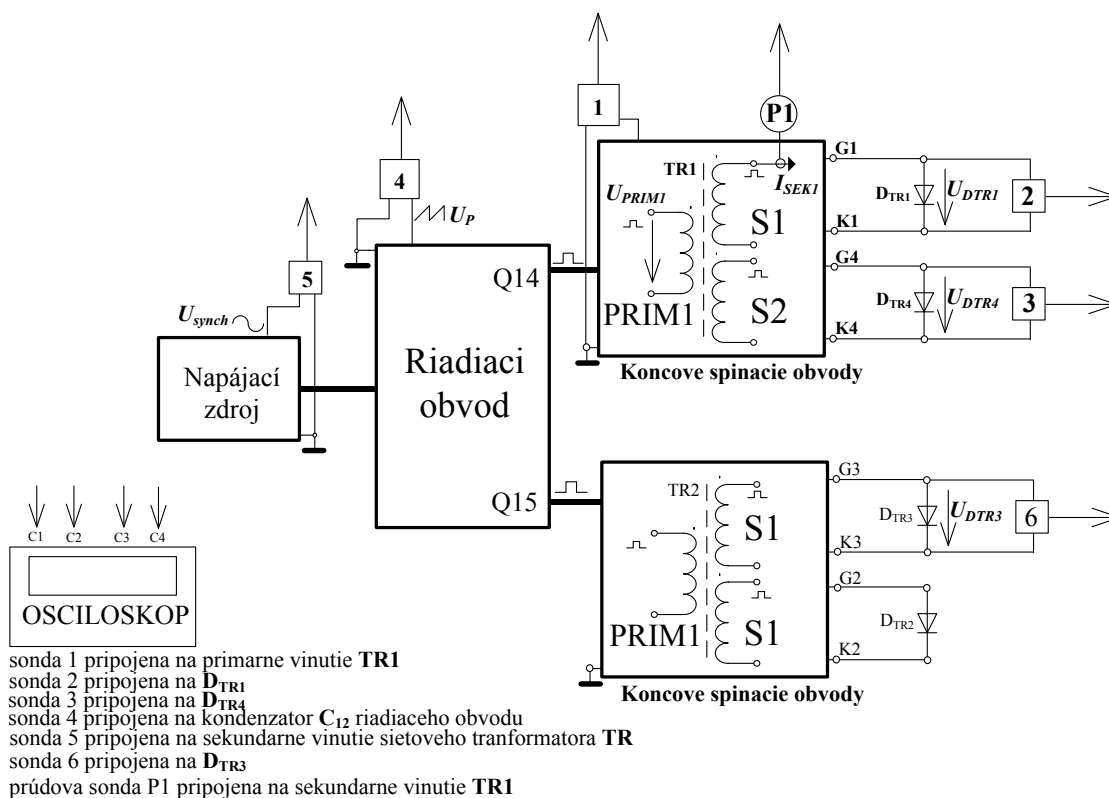


Obr. 23: Napájací zdroj

4. Meranie na realizovanej riadiacej jednotky

4.1. Overenie funkcie navrhnutého impulzného transformátora

Navinuté impulzné transformátory TR1 a TR2 sme zapojili podľa obr. 19 a tvoria základ koncových spínacích obvodov riadiacej jednotky. Tieto obvody sme následne pripojili k výstupom riadiacej časti Q14 a Q15 z obr. 18. Na výstupné svorky spínacích obvodov G(1,2,3,4), K(1,2,3,4) boli pripojené diódy $D_{TR(1,2,3,4)}$ pre simuláciu PN prechodov (Gate - Katóda) tyristorov. Meranie prebiehalo za pomoci osciloskopu, napät'ových a prúdovej sondy. Pripojenie napät'ových sond a prúdovej sondy do obvodu pre jednotlivé merania môžeme vidieť na blokovej schéme zapojenia obr. 24.

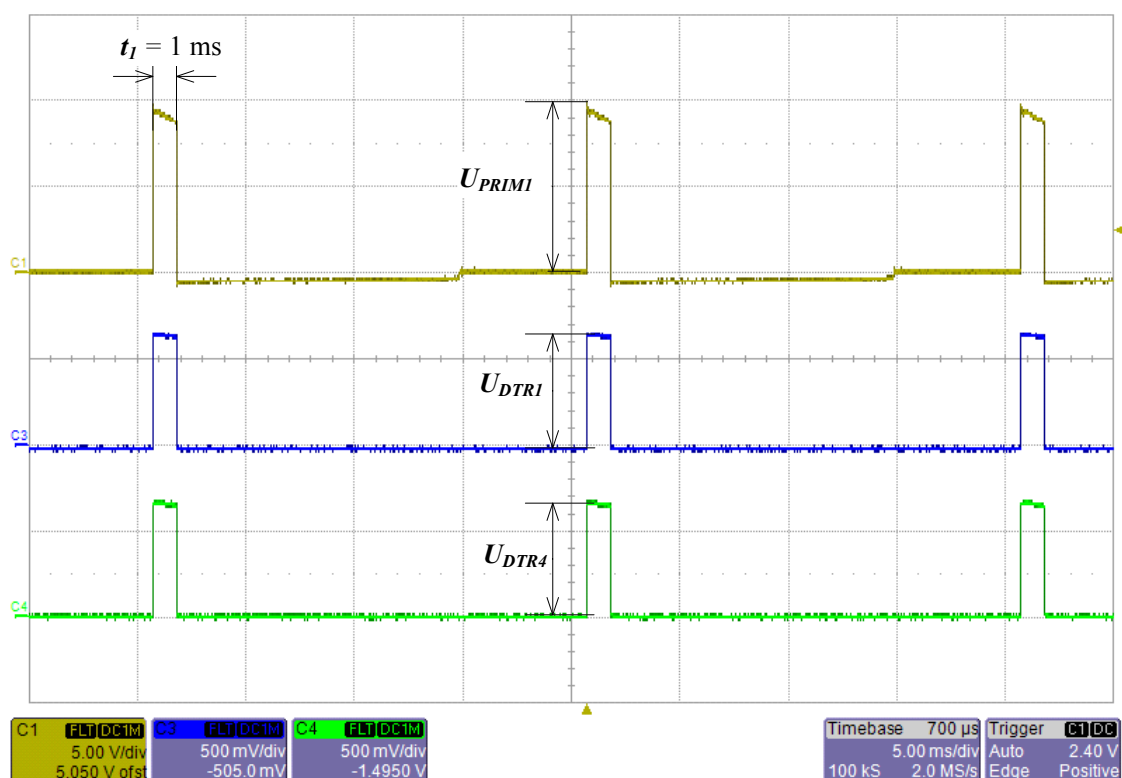


Obr. 24: Blokova schéma zapojenia k meraniu.

• Meranie napätia na primárnej a sekundárnej strane impulzného transformátora

Na obr. 25 sú zobrazené priebehy jednotlivých napät'ových impulzov nameraných na TR1. K meraniu boli použité napät'ové sondy, ktoré boli zapojené do obvodu podľa blokovej schémy na obr. 24. Priebehy na transformátore TR2 sú totožné, a preto postačí zobrazenie priebehov len na TR1. Prvý priebeh zobrazuje napät'ové impulzy na primárnom vinutí

transformátora TR1 namerané napät'ovou sondou 1 pripojenou na kanál C1 osciloskopu. Tieto napät'ové impulzy dosahujú podľa predpokladu požadované parametre a to amplitúdu $U_{PRIM1} = 10\text{ V}$ a dĺžku trvania impulzu $t_I = 1\text{ ms}$. Druhý a tretí priebeh zobrazuje napät'ové impulzy na diódach $D_{TR(1,4)}$ pripojených k výstupom celého spínacieho obvodu. Tieto priebehy boli namerané napät'ovou sondou 2 pripojenou na kanál C3 osciloskopu a sondou 3 pripojenou na kanál C4 osciloskopu. Napät'ová úroveň týchto impulzov sa rovná úbytku napätia na jednotlivých diódach, čo odpovedá hodnote $U_{DTR1(DTR4)} = 650\text{ mV}$ a dĺžka trvania impulzu u oboch priebehov je $t_I = 1\text{ ms}$.



Obr. 25: Priebehy napätia na primárnej a sekundárnej strane impulzného transformátora.

Kanál C1 – napät'ové impulzy na primárnom vinutí TR1.

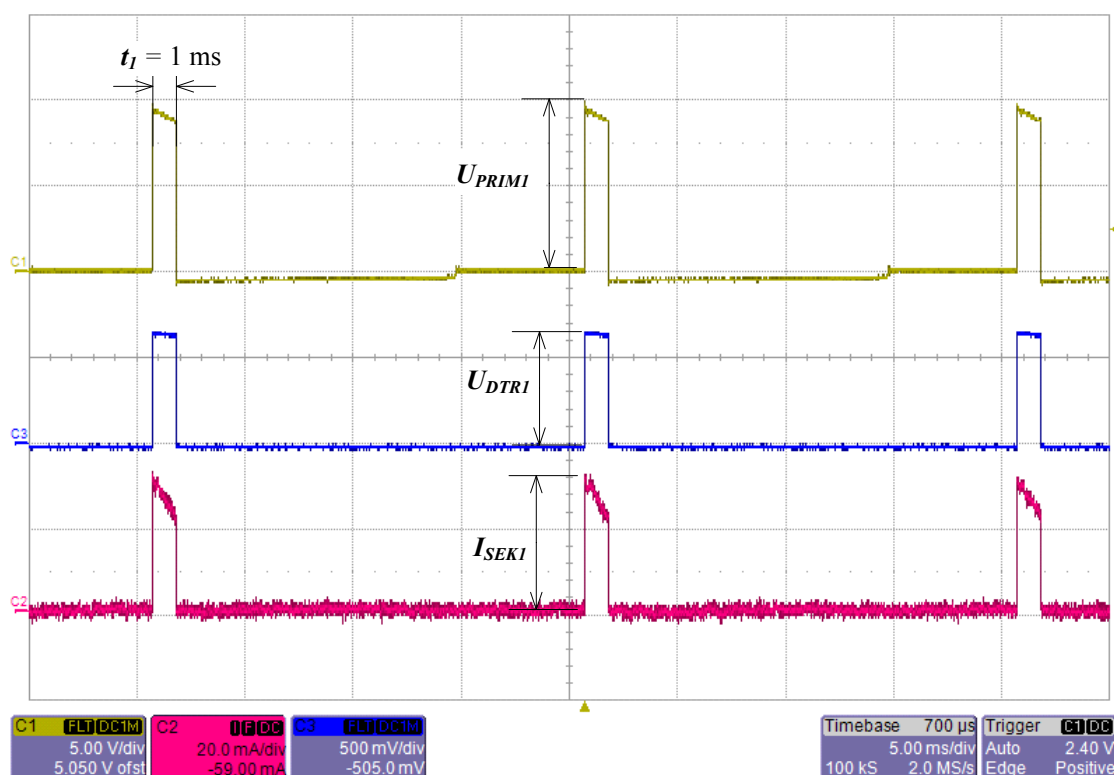
Kanál C3 - napät'ové impulzy na dióde D_{TR1} .

Kanál C4 - napät'ové impulzy na dióde D_{TR4} .

- **Meranie napätia na primárnej a napätia a prúdu na sekundárnej strane impulzného transformátora**

Obr. 26 vykresľuje priebeh napätia na primárnej a priebeh napätia a prúdu na sekundárnej strane impulzného transformátora TR1. K meraniu boli použité napät'ové sondy, ktoré boli zapojené do obvodu podľa blokovej schémy na obr. 24. Priebehy na transformátore TR2 sú totožné, a preto

postačí zobrazenie priebehov len na TR1. Prvý priebeh zobrazuje napäťové impulzy na primárnom vinutí transformátora TR1 merané napäťovou sondou 1 pripojenou na kanál C1. Tieto napäťové impulzy dosahujú podľa predpokladu požadované parametre a to amplitúdu $U_{PRIMI} = 10\text{ V}$ a dĺžku trvania impulzu $t_I = 1\text{ ms}$. Druhý priebeh zobrazuje napäťové impulzy na dióde D_{TR1} pripojenej k výstupu G1 a K1 spínacieho obvodu. Tento priebeh bol nameraný napäťovou sondou 2 pripojenou na C3 osciloskopu. Napäťová úroveň výstupných impulzov sa rovná úbytku napätia na tejto dióde, čo odpovedá hodnote $U_{DTRI} = 650\text{ mV}$ a dĺžka trvania impulzu je $t_I = 1\text{ ms}$. Na treťom priebehu je vidieť prúd sekundárnym vinutím S1 transformátora TR1 nameraný prúdovou sondou P1 pripojenou na kanál C2 osciloskopu. Veľkosť tohto prúdu po odčítaní z priebehu je $I_{SEKI} = 35\text{ mA}$.



Obr. 26: Priebeh napätia na primárnej a priebeh napätia a prúdu na sekundárnej strane impulzného transformátora.

Kanál C1 – napäťové impulzy na primárnom vinutí TR1.

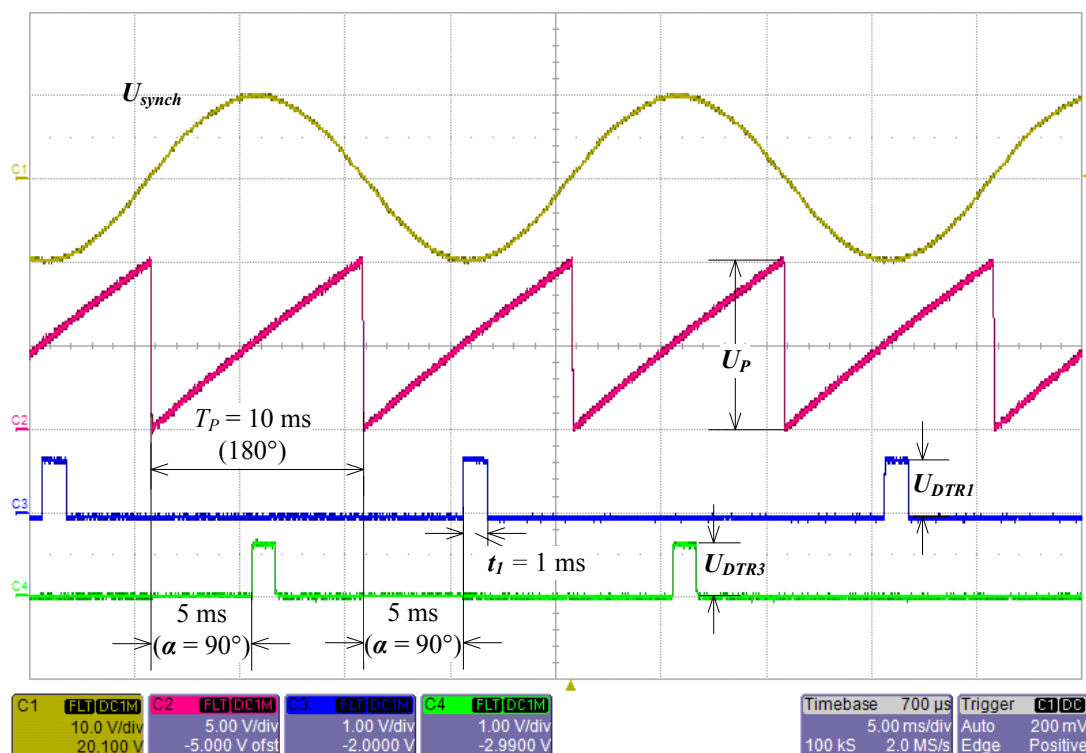
Kanál C3 - napäťové impulzy na dióde D_{TR1} .

Kanál C2 - prúdové impulzy sekundárneho vinutia S1 transformátora TR1.

4.2. Overenie funkcie riadiacej jednotky pri zmene riadiaceho uhla α

Na obr. 27 sú zobrazené priebehy jednotlivých napäťových signálov. K meraniu boli použité napäťové sondy, ktoré boli zapojené do obvodu podľa blokovej schémy k meraniu (obr. 24). Prvý priebeh zobrazuje synchronizačné napätie U_{synch} na sekundárnom vinutí transformátora TR

napájacieho zdroja, namerané pomocou napäťovej sondy 5 pripojenou na kanál C1 osciloskopu. Druhý priebeh predstavuje napätie pily U_p na kondenzátore C_{12} riadiaceho obvodu. Toto napätie bolo namerané sondou 4 pripojenou na kanál C2. Napätia pily dosahuje hodnotu $U_p = 10\text{ V}$ s periódou $T_p = 10\text{ ms}$. Tretí priebeh zobrazuje napäťové impulzy na dióde D_{TR1} pripojenej k výstupu G1 a K1 spínacieho obvodu. Tento priebeh bol nameraný napäťovou sondou 2 pripojenou na kanál C3 osciloskopu. Štvrtý priebeh zobrazuje napäťové impulzy na dióde D_{TR3} pripojenej k výstupu G3 a K3 druhého spínacieho obvodu. Tento priebeh bol nameraný napäťovou sondou 6 pripojenou na kanál C4 osciloskopu. Napäťová úroveň týchto dvoch výstupných impulzových priebehov sa rovná úbytku napätia na jednotlivých diódach, čo odpovedá hodnote $U_{DTR1(DTR3)} = 650\text{ mV}$ a dĺžka trvania impulzu u oboch priebehov je $t_l = 1\text{ ms}$. Pričom tieto dva výstupné signály sú vzájomne fázovo posunuté o 180° a riadiaci uhol $\alpha = 90^\circ$. Ďalšie priebehy pre iné hodnoty nastaveného riadiaceho uhla α sú uvedené v prílohe 1.



Obr. 27: Priebehy napätia jednotlivých signálov nameraných na riadiacej jednotke pri $\alpha = 90^\circ$.

Kanál C1 – synchronizačné napätie U_{synch} .

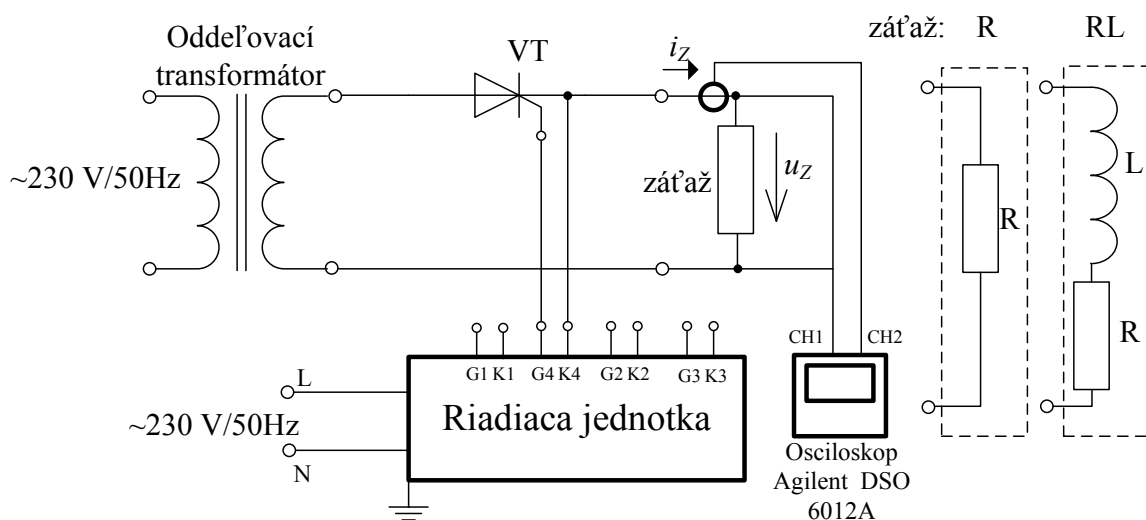
Kanál C2 – napätie pily U_p .

Kanál C3 – napäťové impulzy na dióde D_{TR1} .

Kanál C4 – napäťové impulzy na dióde D_{TR3} .

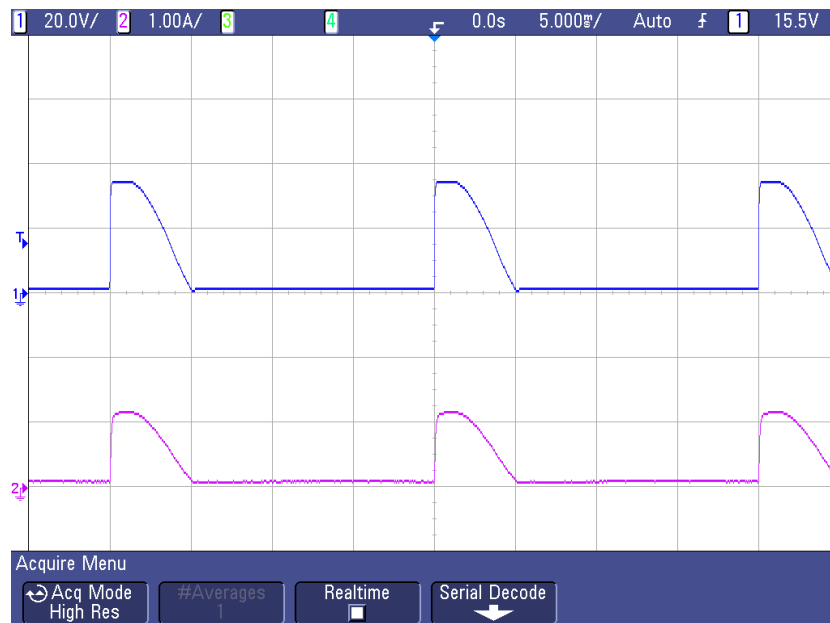
4.3. Overenie funkcie riadiacej jednotky pripojenej k jednopulznemu usmerňovaču

Meranie prebiehalo pod dohľadom vedúceho práce. Pre overenie funkcie na dvojpulznom usmerňovači sme nemali k dispozícii usmerňovač s tyristormi, ktoré by riadiaca jednotka spoľahlivo spínala (tyristory mali príliš vysokú hodnotu zapínacieho prúdu hradla). Preto sme sa rozhodli riadiacu jednotku pripojiť na jednopulzný usmerňovač. Pre jednopulzný riadený usmerňovač bol použitý tyristor VT s nižšou hodnotou zapínacieho prúdu hradla. Meranie prebiehalo pri odporovej (R) a odporovo-indukčnej (RL) záťaži. Správnu funkciu sme overili v celom rozsahu riadenia, tzn. $0^\circ < \alpha < 180^\circ$. Schéma zapojenia merania je uvedená na obr. 28. Na zobrazenie priebehu napätia u_Z na záťaži sme využili osciloskop s napäťovou sondou pripojenou na kanál CH1 a prúdovú sondu pripojenú na kanál CH2 osciloskopu. Tá nám poslúžila k zobrazeniu prúdu i_Z pretekajúceho záťažou.



Obr. 28: Schéma zapojenia merania pre R a RL zát'az.

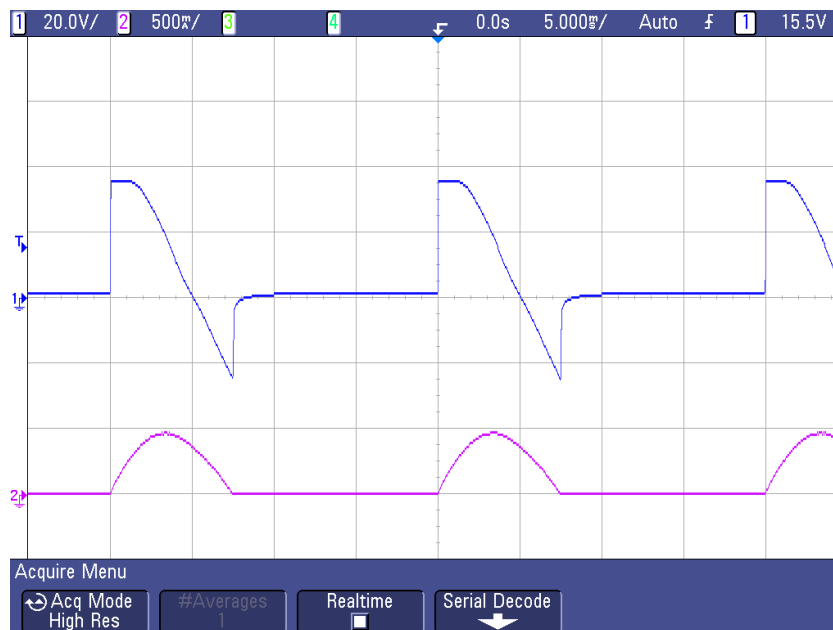
- Meranie s pripojenou odporovou záťažou



Obr. 29: Priebeh napätia a prúdu na odporovej záťaži pri riadiacom uhle $\alpha = 90^\circ$.

Kanál CH1 – napätie na záťaži u_Z , kanál CH2 – prúd záťaže i_Z .

- Meranie s pripojenou RL záťažou



Obr. 30: Priebeh napätia a prúdu na RL záťaži pri riadiacom uhle $\alpha = 90^\circ$.

Kanál CH1 – napätie na záťaži u_Z , kanál CH2 – prúd záťaže i_Z .

5. Záver

V práci som sa zaoberal problematikou riadenia jednofázových usmerňovačov. V teoretickej časti je spracované rozdelenie a prehľad niekoľkých typických zapojení riadiacich obvodov a k nim príslušný popis. V praktickej časti som sa zamerlal na návrh a zhotovenie plne funkčnej riadiacej jednotky, ktorá je schopná po pripojení k jednotlivým tyristorom jednofázového riadeného usmerňovača, meniť strednú hodnotu napätia na výstupe usmerňovača od nulovej po maximálnu hodnotu. Celková riadiaca jednotka pozostáva z troch častí a to napájanie, riadiaca časť a koncové spínacie obvody. Jednotlivé časti sú spracované v kapitole 3 tejto práce. Celková schéma riadiacej jednotky je ďalej uvedená v prílohe 2. Súčasne s návrhom celkového zapojenia bolo potrebné navrhnuť dva impulzné transformátory. Po spracovaní návrhu bolo potrebné urobiť experimentálne testovanie, resp. vytvoriť skúšobné zapojenie na kontaktnom poli. Toto skúšobné zapojenie nám pomohlo k doladeniu obvodu a hlavne preveriť funkciu jednotlivých častí celého zapojenia. Po preverení a doladení celého zapojenia sa prešlo k návrhu samotnej dosky plošných spojov (DPS) pomocou programu eagle. Následne bola vytvorená jednostranná DPS, ktorú sme osadili jednotlivými súčiastkami, oživilí a opätovne preverili funkciu.

Pri praktickom meraní bola overená celková funkcia zhotovenej riadiacej jednotky, predovšetkým správna funkcia pri zmenách riadiaceho uhla α . Na základe tohto merania bolo vyhodnotené, že riadiaca jednotka je schopná generovať riadiace impulzy predpokladaných parametrov, a to v rozsahu od 0° do 180° . Ďalšou časťou merania bolo overenie funkcie riadiacej jednotky pripojenej k jednopulznému usmerňovaču. Ukázalo sa, že jednotka pracuje správne v celom rozsahu riadenia $0^\circ < \alpha < 180^\circ$. Meranie prebiehalo za použitia dvoch typoch záťaže. Ako prvá bola pripojená čisto odporová, a následne sme overili funkciu pre rôzne hodnoty riadiaceho uhla α . Pripojením odporovo – indukčnej záťaže sme postupovali rovnako. Priebehy napätia a prúdov na jednotlivých typoch záťaže sú uvedené v podkapitole 4.3. Ostatné priebehy sú uvedené v prílohe 2. Na základe overenia správnej funkcie sme dospeli k záveru, že všetky predpokladané podmienky boli splnené a bola vytvorená plne funkčná riadiaca jednotka.

S realizáciou riadiacej jednotky, ako aj s vyhodnotením a spracovaním výsledkov neboli žiadne problémy. Samotnú riadiacu jednotku môžeme použiť ako súčasť jednofázového plne riadeného usmerňovača, ktorý môže slúžiť v elektrických pohonoch k regulácii napr. univerzálnych motorov. U týchto typov motorov umožňuje regulovať rotorové napätie alebo budiaci prúd. Ďalej je možné regulovať prúd budenia synchronných motorov. Riadene usmerňovače sa používajú aj na reguláciu tepelného či svetelného výkonu.

Literatúra

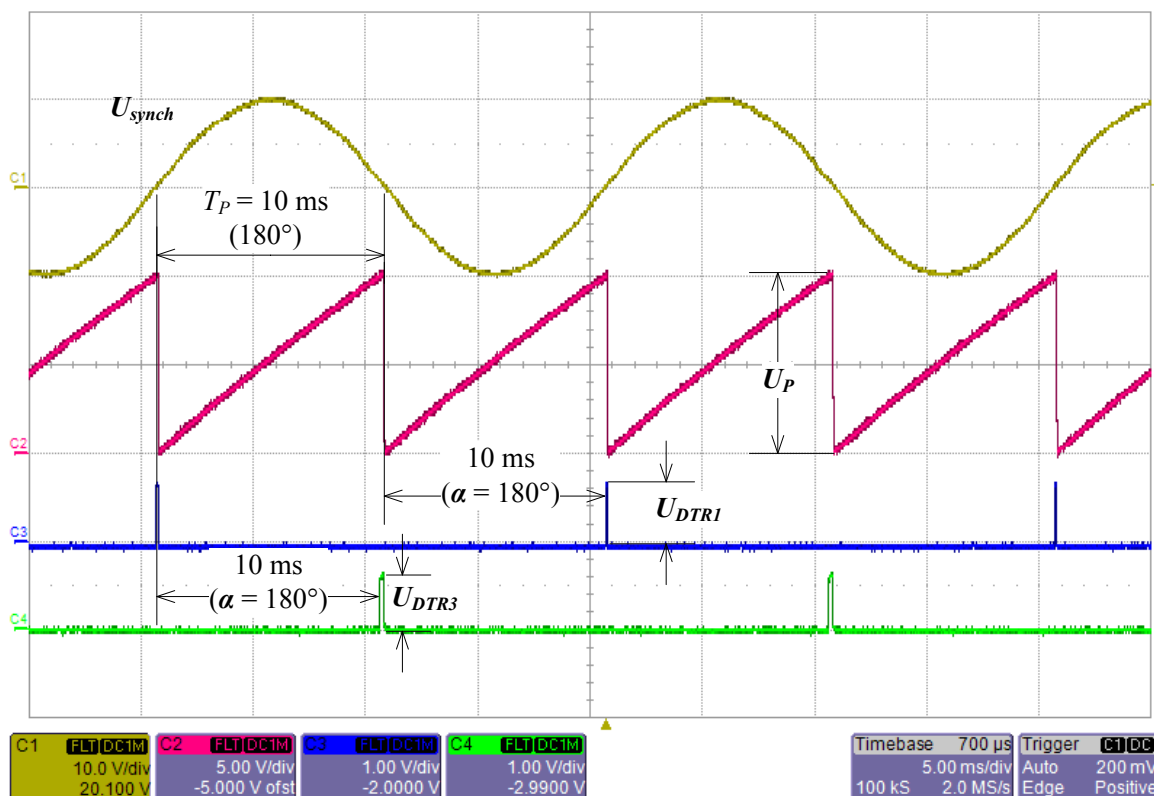
- [1] ZÍKA, Josef; HOLUB, Přemysl. *Praktická zapojení polovodičových diod a tyristorů*. 2., přeprac. vyd. Praha : STNL, 1977. 280 s.
- [2] ZÍKA, JOSEF. *DIODY A TYRISTORY V PRUMYSLOVE ELEKTRONICE*. Druhé, doplněné a přepracované vydání. Praha : STNL, 1979. 438 s.
- [3] CHLEBIŠ, P.: *Řídicí elektronika výkonových měničů. Učební texty pro kombinované a distanční studium* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2005 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~hav278/REVM/Studijni_opory/REVM.pdf
- [4] Atmel phase control devices: Phase Control. [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: http://www.atmel.com/products/automotive/industrial/phase_control.aspx
- [5] Power Electronics and Applications: THYRISTOR RECTIFIERS. [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: <http://www.engr.siu.edu/staff1/hatz/EE483/LABS/Exp3.html>
- [6] Datasheet catalog: Phase Control IC TCA 785. [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/infineon/1-tca785.pdf>
- [7] Feritová jádra. In: [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: http://www.semic.cz/pdf/_3A0A.pdf
- [8] Technické parametry E jader. In: [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: http://www.semic-shop.cz/fotky850/fotov/_3A4B.pdf
- [9] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1. vydání. Praha 10, Věšínova 5: BEN - technická literatura, 1999, 373 s. ISBN 80-86056-49-X.
- [10] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 240 s. ISBN 80-86056-91-0.

Zoznam príloh

| | |
|---|-------------|
| Príloha 1. Namerané priebehy na riadiacej jednotke | I |
| Príloha 2. Namerané priebehy na jednopulznom usmerňovači | III |
| Príloha 3. Celková schéma zapojenia riadiacej jednotky | V |
| Príloha 4. Doska plošných spojov | VI |
| Príloha 5. Zoznam použitých súčiastok..... | VII |
| Príloha 6. Konštrukčné usporiadanie riadiacej jednotky..... | VIII |

Príloha 1. Namerané priebehy na riadiacej jednotke

a) Priebehy pri nastavenom riadiacom uhle $\alpha = 180^\circ$



Obr. 31: Priebehy napätia jednotlivých signálov nameraných na riadiacej jednotke pri $\alpha = 180^\circ$.

Kanál C1 – synchronizačné napätie U_{synch} .

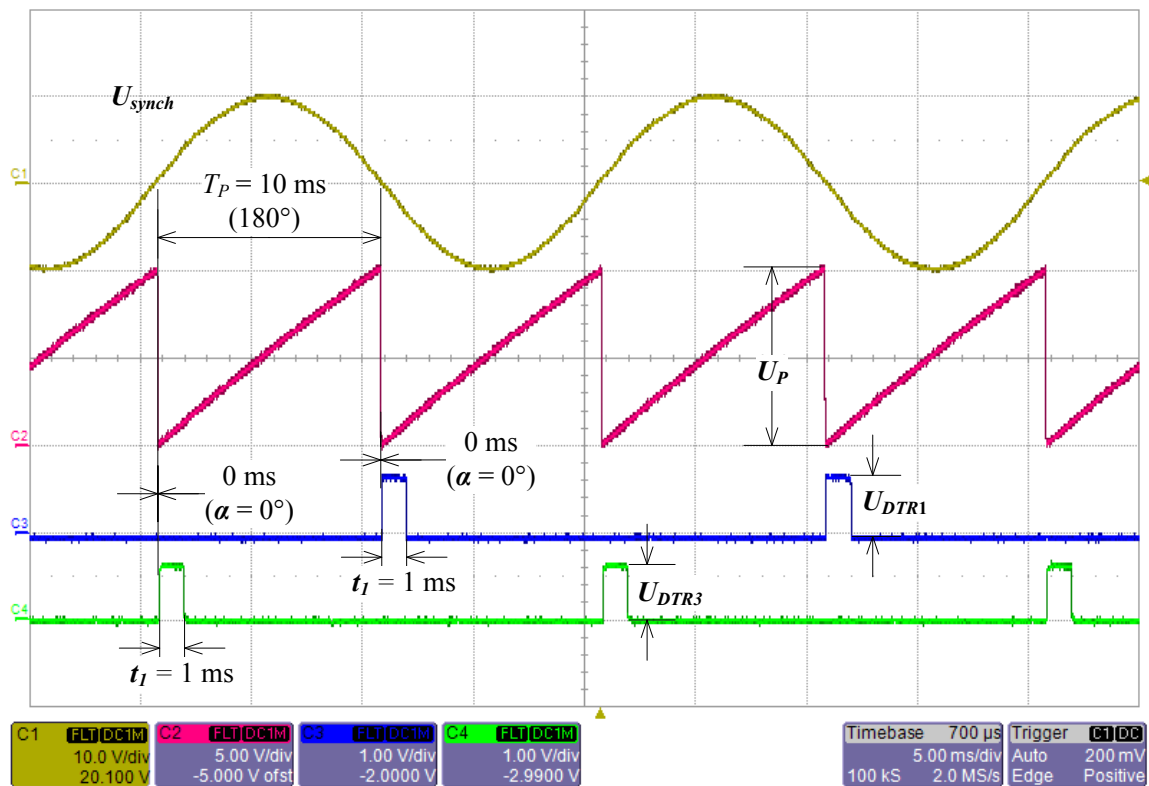
Kanál C3 – napätie píly U_P .

Kanál C4 - napät'ové impulzy na dióde D_{TR1} .

Kanál C4 - napät'ové impulzy na dióde D_{TR3} .

Na obr. 31 vidíme priebehy namerané na riadiacej jednotke pri nastavenom uhle riadenia $\alpha = 180^\circ$. K meraniu boli použité napät'ové sondy, ktoré boli zapojené do obvodu podľa blokovej schémy k meraniu (obr. 24). Napätie píly dosahuje maximálnu hodnotu $U_P = 10$ V s periódou $T_P = 10$ ms. Napät'ová úroveň impulzov U_{DTR1} a U_{DTR3} sa rovná úbytku napätia na diódach D_{TR1} a D_{TR3} , čo odpovedá hodnote $U_{DTR1(DTR3)} = 650$ mV a dĺžka trvania impulzu u oboch priebehov je $t_I = 1$ ms. Pričom tieto dva výstupné signály sú vzájomne fázovo posunuté o 180° .

b) Priebehy pri nastavenom riadiacom uhle $\alpha = 0^\circ$



Obr. 32: Priebehy napätia jednotlivých signálov nameraných na riadiacej jednotke pri $\alpha = 0^\circ$.

Kanál C1 – synchronizačné napätie U_{synch} .

Kanál C3 – napätie píly U_P .

Kanál C4 - napät'ové impulzy na dióde D_{TR1} .

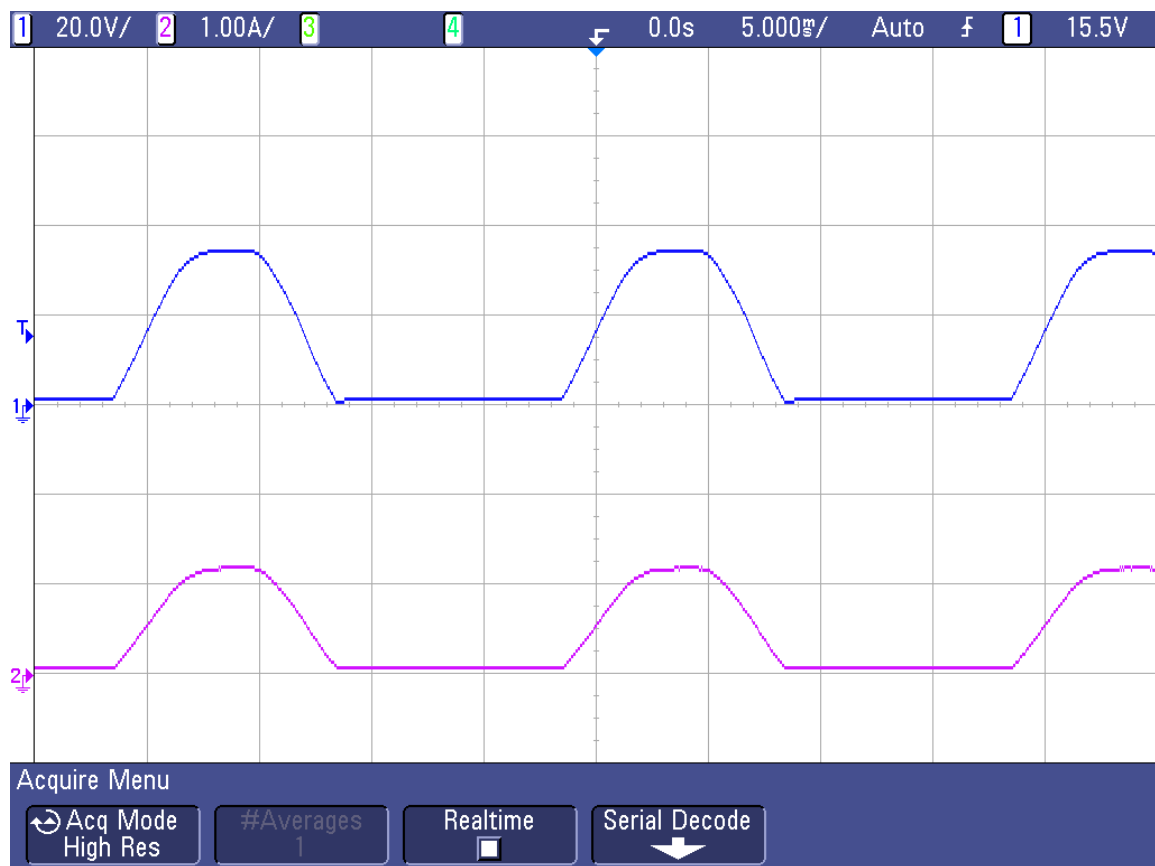
Kanál C4 - napät'ové impulzy na dióde D_{TR3} .

Na obr. 32 vidíme priebehy namerané na riadiacej jednotke pri nulovom uhlu riadenia. K meraniu boli použité napät'ové sondy, ktoré boli zapojené do obvodu podľa blokovej schémy k meraniu (obr. 24). Napätie píly dosahuje maximálnu hodnotu $U_P = 10 \text{ V}$ s periódou $T_P = 10 \text{ ms}$. Napät'ová úroveň impulzov U_{DTR1} a U_{DTR4} sa rovná úbytku napätia na diódach D_{TR1} a D_{TR3} , čo odpovedá hodnote $U_{DTR1(DTR3)} = 650 \text{ mV}$ a dĺžka trvania impulzu u oboch priebehov je $t_I = 1 \text{ ms}$. Pričom tieto dva výstupné signály sú vzájomne fázovo posunuté o 180° .

Príloha 2. Namerané priebehy na jednopulznom usmerňovači

a) Priebehy napätia a prúdu na R záťaži pri nulovom riadiacom uhle

Zapojenie meracieho obvodu je uvedené na obr. 28.

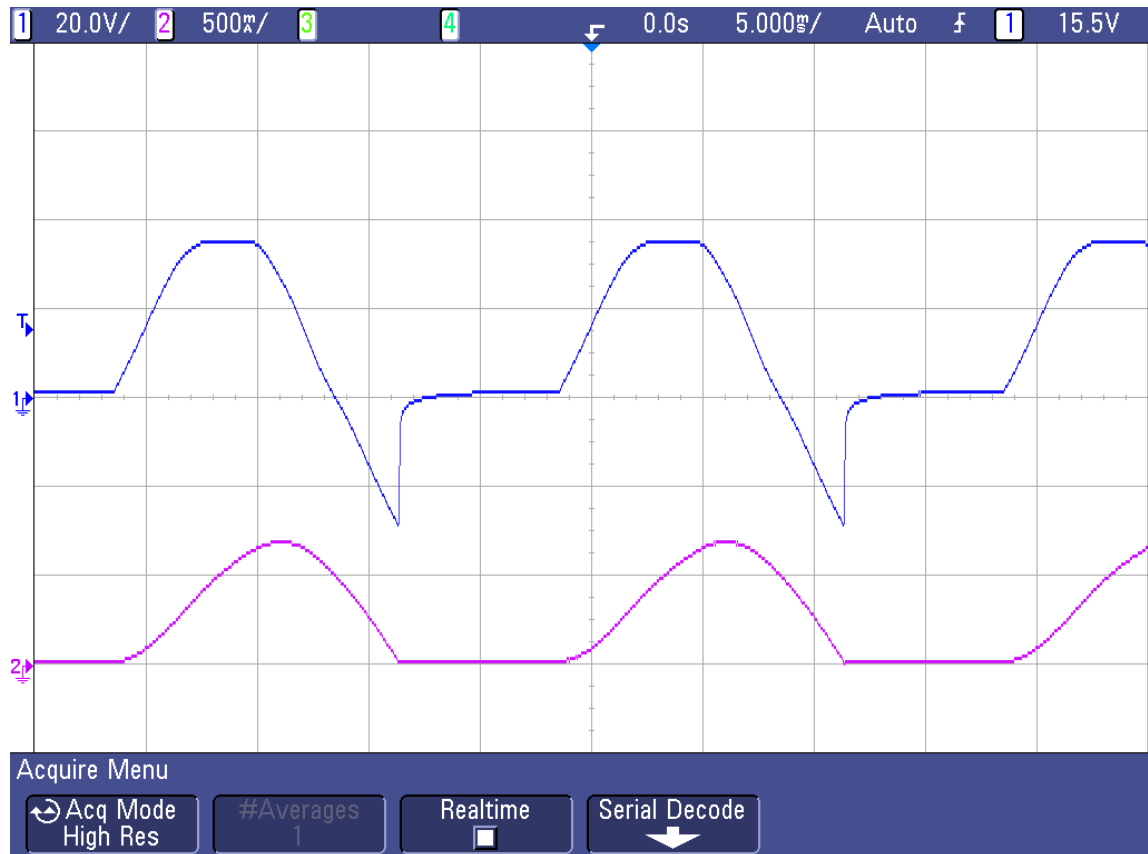


Obr. 33: Priebehy napätia a prúdu na odporovej záťaži pri nulovom riadiacom uhle.

Kanál CH1 – napätie na záťaži u_Z , kanál CH2 – prúd záťaže i_Z .

b) Priebehy napätia a prúdu na RL záťaži pri nulovom riadiacom uhlu

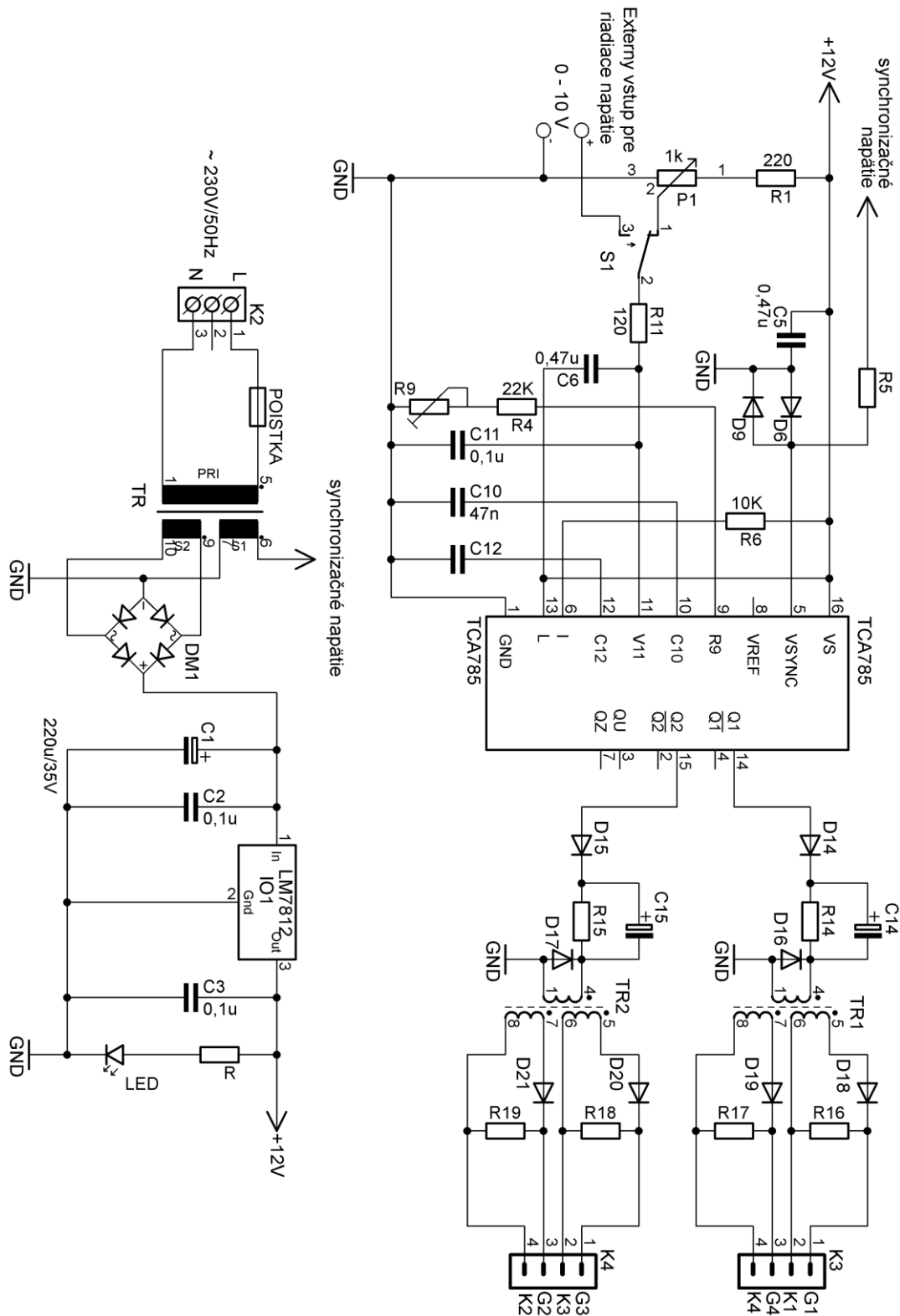
Zapojenie meracieho obvodu je uvedené na obr. 28.



Obr. 34: Priebehy napätia a prúdu na odporovej záťaži pri nulovom riadiacom uhle.

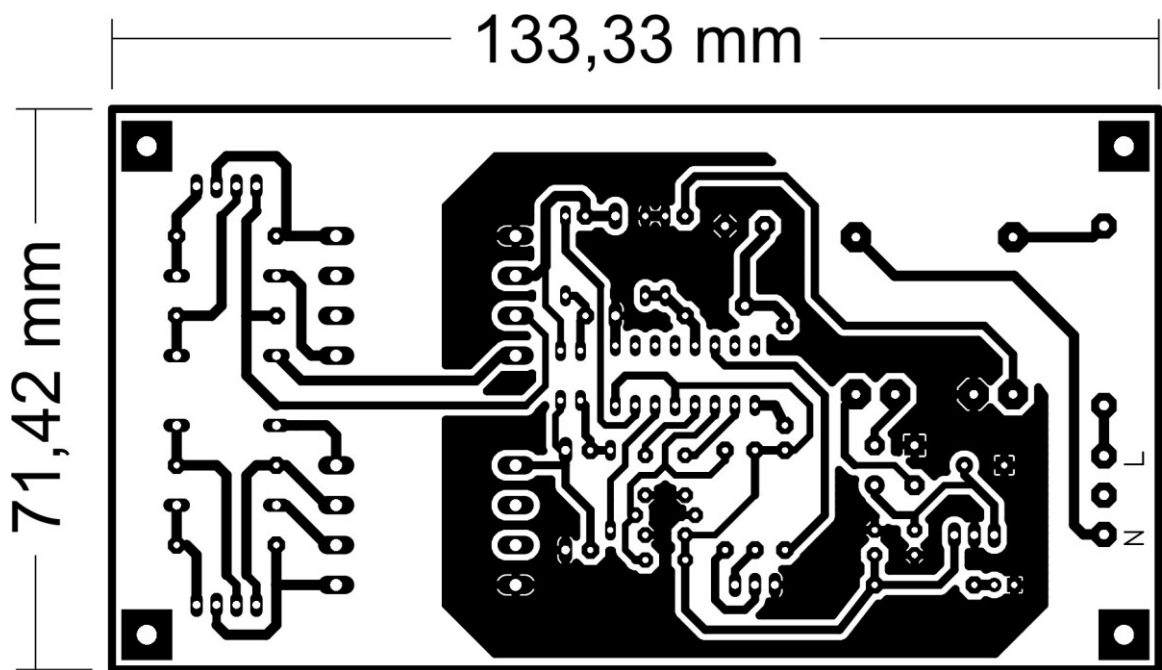
Kanál CH1 – napätie na záťaži u_Z , kanál CH2 – prúd záťaže i_Z .

Príloha 3. Celková schéma zapojenia riadiacej jednotky

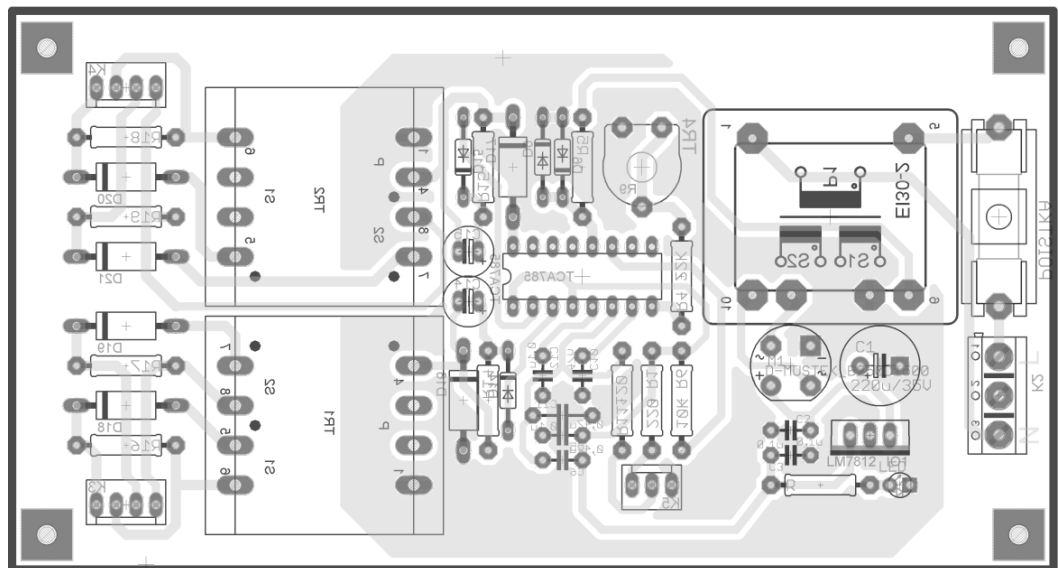


Obr. 35: Schéma zapojenia riadiacej jednotky.

Príloha 4. Doska plošných spojov



Obr. 36: Pohľad na DPS zo strany spojov.

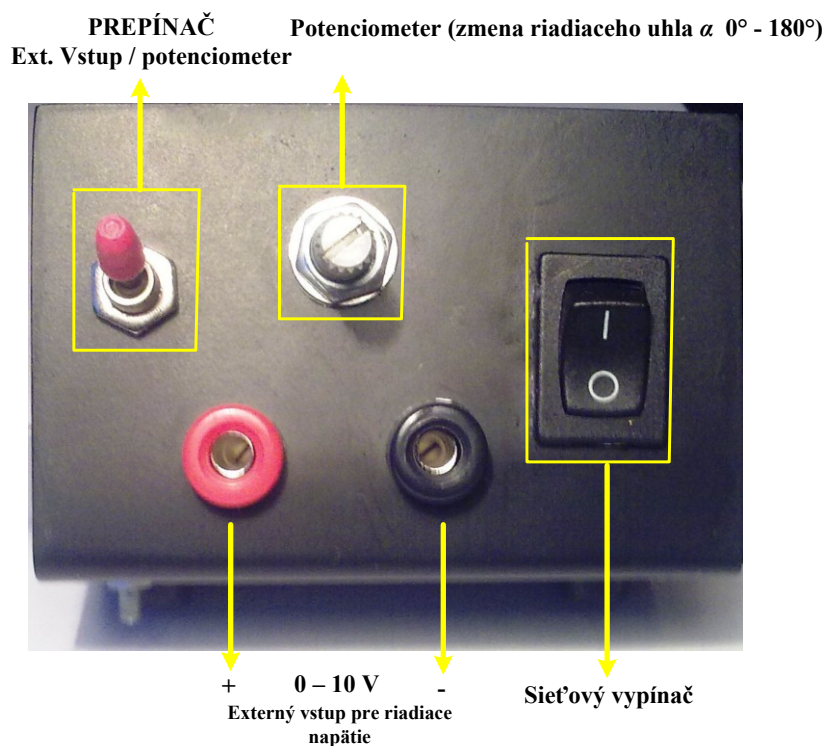


Obr. 37: Rozmiestnenie súčiastok na DPS.

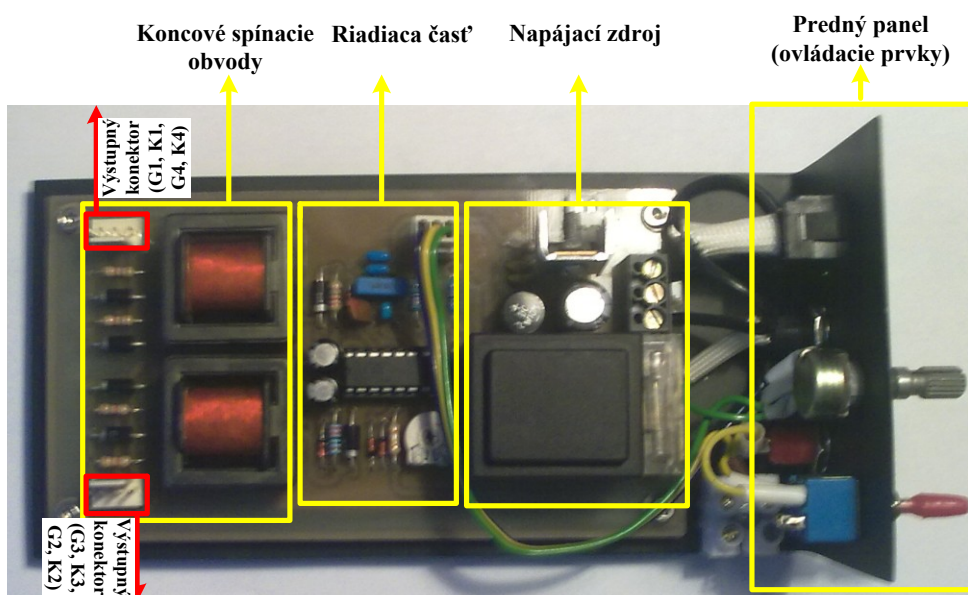
Príloha 5. Zoznam použitých súčiastok

| Schém. označenie súčiastky | Hodnota | Schém. označenie súčiastky | Hodnota |
|---------------------------------|----------------|----------------------------|-------------------------|
| C1 | 220uF/35v | R9/trimer | 100 kΩ |
| C10 | 47nF | R5 | 100 kΩ |
| C12 | 2,2nF | R6 | 10 kΩ |
| C2,C3,C11 | 0,1uF | R4 | 22 kΩ |
| C5,C6 | 0,47uF | R14, R15 | 100 Ω |
| C14, C15 | 22uF/16V | R16, R17, R18, R19 | 1,7 kΩ |
| DM1 | DCW10M | R11 | 120 Ω |
| D16, D17, D18, D19, D20, D21 | BY299 | TR1, TR2 | Impulzne transformátory |
| D6,D9. D14, D15 | 1N4148 | TR | 2x15V/1,5VA |
| K2 | Svorkovnica 3x | S1 | Dvojpohový prepínač |
| K3, K2 | Konektor 4x | POISTKA | 250V/200mA |
| LED | 3mm/červená | Sieťový vypínač | ON/OFF |
| P1 | 1 kΩ | Zdierky | 2x2 mm |
| R | 5,8 kΩ | | |
| R1 | 220 Ω | | |

Príloha 6. Konštrukčné usporiadanie riadiacej jednotky



Obr. 38: Predný panel a rozmiestnenie ovládacích prvkov.



Obr. 39: Pohľad na usporiadanie riadiacej jednotky.